



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**PROVOZNÍ KONTROLA KVALITY LITINOVÝCH
ODLITKŮ VE SLÉVÁRNĚ**

QUALITY CONTROL OF THE IRON CASTINGS IN THE FOUNDRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matěj Krvač

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav materiálových věd a inženýrství
Student:	Matěj Krvač
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Materiálové inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Provozní kontrola kvality litinových odlitků ve slévárně

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student provede rešerši současných způsobů kontroly kvality litinových odlitků v provozu slévárny. Z vybraných materiálů připraví vzorky pro metalografickou analýzu a vyhodnocení mikrostruktury. Na základě dodaných výsledků chemického složení a výsledků mechanických zkoušek spolu s vlastním hodnocením mikrostruktury vzorků provede celkové zhodnocení kvality vybraných materiálů.

Cíle bakalářské práce:

Vypracovat literární rešerši na téma současných způsobů kontroly kvality litinových odlitků v provozu slévárny. Na základě hodnot mechanických vlastností a výsledků mikrostrukturní analýzy provést celkové zhodnocení kvality vybraných materiálů včetně návrhu pro její další zlepšení.

Seznam doporučené literatury:

SKOČOVSKÝ, P., T. PODRÁBSKÝ. Grafitické liatiny. 1. vydanie. Žilina: EDIS, 2005. ISBN 80-807- -390-6.

ELBEL, T. a kol. Vady odlitků ze slitin železa. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992, 340 s.

ŠENBERGER, J., Z. BŮŽEK, A. ZÁDĚRA, K. STRÁNSKÝ, V. KAFKA. Metalurgie oceli na odlitky. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství VUTIUM, 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-3- 32-9.

STRÁNSKÝ, K. Nejčastější vady odlitků ze slitin železa, jejich příčiny a prevence. Slévárenství, roč. 46, č. 2, 1996, s. 136–142.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

.....
prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

.....
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vlastnostmi litiny s lupínkovým grafitem a litiny s kuličkovým grafitem. Teoretická část byla zaměřena na poznatky, které se týkaly chemického složení, mechanických vlastností a sledování vnitřních vad. V experimentální části se hodnotí struktury v neleptaném a leptaném stavu. Porovnává se chemické složení a mechanické vlastnosti s literaturou. Pomocí rentgenových snímků se sledují vnitřní vady. Závěrem jsou shrnuty výsledky experimentů a navržena opatření pro zvýšení kvality jakosti odlitků.

Klíčová slova

Litina s kuličkovým grafitem, litina s lupínkovým grafitem, odlitek, mechanické vlastnosti, struktura, vnitřní vady

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the properties of castings with ductile iron and gray iron. The theoretical part was focused on knowledge related to chemical composition, mechanical properties and monitoring of internal defects. In the experimental part, the structure is evaluated in non-etched and etched state. It compares with the chemical component and the mechanical properties with the literature. X-ray frames are monitored for internal defects. In conclusion, the results of the experiments are summarized and measures are proposed to improve the casting quality.

Key words

Ductile iron, gray iron, casting, properities, structure, internal defects

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRVAČ, M. *Provozní kontrola kvality litinových odlitků ve slévárně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 61 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Provozní kontrola kvality litinových odlitků ve slévárně, jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **24. 5. 2018**

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D., za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc během řešení této bakalářské práce.

Děkuji také pracovníkům slévárny Alfe Brno s.r.o., zvláště pak Ing. Radimovi Jelínkovi, za cenné rady.

Zvláštní poděkování patří přítelkyni, rodině a blízkým za toleranci a morální podporu v průběhu studia.

V Brně dne: **24. 5. 2018**

.....

podpis autora

Obsah

1. Úvod.....	10
1.1. Alfe Brno s.r.o.	10
2. Klasifikace litin	10
2.1. Základní rozdělení litin	11
2.2. Litina s lupínkovým grafitem (LLG)	12
2.3. Litina s kuličkovým grafitem (LKG).....	13
3. Destruktivní zkoušky mechanických vlastností materiálů	15
3.1. Zkouška tahem	15
3.2. Zkoušky tvrdosti	18
3.2.1. Zkoušení tvrdosti dle Brinella	19
4. Nedestruktivní zkoušení vnitřních vad materiálu.....	20
4.1. Zkouška ultrazvukem.....	21
4.1.1. Základní metody zkoušení ultrazvukem.....	22
4.2. Prozařování	24
5. Metalografická analýza	25
5.1. Makrostruktura.....	25
5.2. Mikrostruktura	25
6. Vyhodnocení chemického složení.....	26
6.1. Litina s lupínkovým grafitem	26
6.2. Litina s kuličkovým grafitem.....	32
7. Vyhodnocení tahových zkoušek.....	37
7.1. Vyhodnocení tahových zkoušek litiny s lupínkovým grafitem	37
7.2. Vyhodnocení tahových zkoušek litiny s kuličkovým grafitem	38
8. Vyhodnocení zkoušek tvrdosti	40
9. Metalografické hodnocení vzorků.....	42
9.1. Vyhodnocení vzorků z litiny s kuličkovým grafitem	42
9.2. Vyhodnocení vzorků z litiny s lupínkovým grafitem	43
10. Vyhodnocení vnitřních vad pomocí prozařovací metody.....	45
11. Závěr.....	47
Seznam použité literatury	48
Seznam obrázků a tabulek	50
Seznam obrázků.....	50
Seznam tabulek	51
Seznam použitých zkratk a symbolů	52
Seznam příloh	54
Přílohy	54

1. ÚVOD

Litiny tvoří největší podíl ze všech slévárenských slitin. V ČR se ročně vyrábí asi kolem 400000 t litinových odlitků, což je asi 70 % hmotnosti všech odlévaných slitin. V současné době asi 85 % objemu všech litinových odlitků tvoří litina s lupínkovým grafitem (LLG), méně než 15 % litina s kuličkovým grafitem (LKG). I když podíl LKG se v ČR stále zvyšuje, neodpovídá uvedená struktura výroby trendu v průmyslově vyspělých státech, kde podíl litiny s kuličkovým grafitem představuje 20-35 % a dále se zvyšuje. Odlitky z LKG často nahrazují dražší odlitky ocelové a přináší některé výhodnější výrobní i uživatelské parametry. Výroba litinových odlitků má v České republice dlouholetou tradici a v současné době se s produkcí více než 40 kg na 1 obyvatele stále řadí na přední místa světového žebříčku. [1]

1.1. Alfe Brno s.r.o.

Je to malá slévárna s 25 zaměstnanci, založena v roce 1912, známá jako první česká slévárna na Brněnsku. Prvním názvem byla *Moravia – slévárna železa a kujné litiny*. V roce 1950 po znárodnění byla připojena k firmě *Mosilana* a poté k textilní firmě *Partex Nová Včelnice*. Díky tomu se výroba věnovala odlitkům textilních strojů. Od roku 1992 je opět majetkem soukromé osoby, a to paní Hany Portové, která je vnučkou zakladatele Antonína Harašty. [2]

Hlavním produktem slévárny jsou odlitky z litiny s lupínkovým a s kuličkovým grafitem. Litina s lupínkovým grafitem se ve slévárně *Alfe Brno* odlévá od zakoupení spektrálního emisního kvantometru v roce 2008. Hlavní část výroby tvoří kusová, malosériová až sériová výroba průmyslových odlitků. Odlévají se do ručně formovaných pískových forem. Většina odlitků zde vyrobených z litiny má hmotnost od 3 do 100 kilogramů. [3]

Významný objem vyrobených odlitků tvoří výroba odlitků dekorativní, městské a zahradní litiny. Tato sekce zahrnuje například schodišťová zábradlí, mříže kolem stromů, poštovní schránky apod. Ve spolupráci se stavebními firmami se slévárna *ALFE Brno s.r.o.* podílí na rekonstrukci historických budov a objektů. Nejznámější z historických komplexů, které slévárna pomáhala rekonstruovat je například zámek Hluboká, zámek Mariánská Týnice nebo také Český národní dům v New Yorku. [4]

Podstatně menší objem výroby tvoří odlévání přesných odlitků ze zinku pomocí technologie odstředivého lití do gumových forem. Tímto způsobem odlévání se dosahuje vysoké jakosti povrchu odlitků a jejich rozměrové přesnosti. [5]

Dále se zde vyrábí, pomocí odstředivého lití do gumových forem, malé odlitky z cínu a olova. Sortiment převážně obsahuje upomínkové a dekorativní předměty. [6]

Spolupráce s firmou *Alfe Brno s.r.o.* vznikla v roce 2016, když mě paní Portová zaměstnala. Veškeré vzorky použité pro tuto práci zde byly vyrobeny. Všechny výdaje bakalářské práce spojené s přípravou a hodnocení vzorků uhradila firma. Výsledky této práce budou uplatněny při optimalizaci výrobní technologie ve slévárně *Alfe Brno*.

2. KLASIFIKACE LITIN

Litiny jsou slitiny železa s uhlíkem a dalšími důležitými prvky, jako jsou křemík, mangan, síra a fosfor. V litinách je uhlík vyloučen ve formě grafitu nebo je vázán jako karbid Fe_3C , případně karbid jiného prvku. Charakteristickou vlastností litin je obsah uhlíku vyšší, než je jeho maximální rozpustnost v austenitu při eutektické teplotě, tedy více než cca 2,14 %. [1]

Důležitým diagramem pro popis tuhnutí a struktury litin je stabilní diagram Fe-C a metastabilní diagram Fe-Fe₃C. Pokud se uhlík vylučuje podle stabilního diagramu, vzniká grafit. Litiny s uhlíkem vyloučeným ve formě grafitu se nazývají grafitické. Vzniká v nich při tuhnutí grafitické eutektikum (grafit a austenit). Pokud probíhá tuhnutí litiny podle metastabilního systému, vylučuje se uhlík v podobě cementitu nebo jiného karbidu. Metastabilní tuhnutí litin se používá při výrobě bílé a temperované litiny. Ve struktuře litin s lupínkovým grafitem se nachází primární fáze a eutektikum. [1] [7]

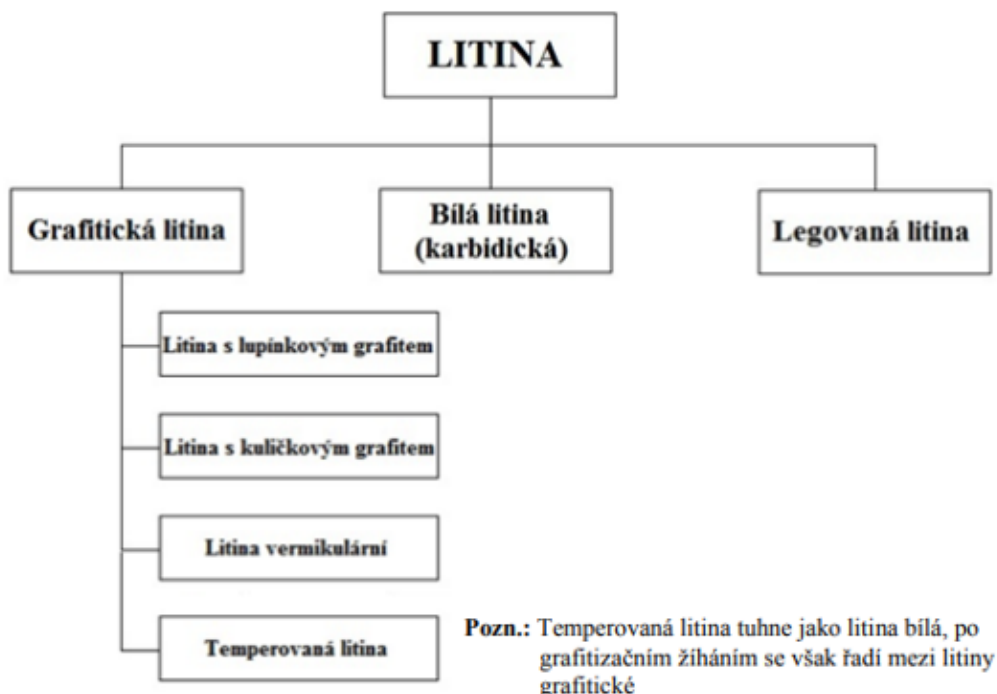
Nejpoužívanější grafitickou litinou v průmyslu je litina s lupínkovým nebo kuličkovým grafitem. Litinové odlitky často používané v automobilovém průmyslu jsou z litiny s vermikulárním, nazývanou také jako litinou s červíkovitým grafitem.

Bílé neboli karbidické litiny se vyznačují vysokou tvrdostí, ale zároveň křehkostí, tudíž jsou v podstatě neobrobitelné. Využívají se jako otěruvzdorné litiny nebo k výrobě temperované litiny. [1] [7]

Litina, která je přechodovým typem mezi karbidickými a grafitickými litinami, se nazývá maková. Dalším zvláštním případem bílé litiny je litina temperovaná. Ta tuhne v metastabilním systému. Pomocí temperace se z ní stává litina, kterou řadíme mezi grafitické. Temperace je grafitizační žhání, při kterém dochází k rozložení eutektických karbidů a ledeburitu na volný temperovaný grafit. [1]

2.1. Základní rozdělení litin

Dle literatury [7] se litiny dělí na litiny grafitické, bílé (nelegovanou) a legované litiny. Dále se nám grafitické litiny dělí podle tvaru grafitu. Rozdělení litin je zobrazeno na **obr. 1**. [7]



Obr. 1 Základní rozdělení litin [7]

2.2. Litina s lupínkovým grafitem (LLG)

Litina s lupínkovým grafitem se dříve nazývala jako šedá litina. Jak je výše zmíněno, je to litina krystalizující přibližně dle diagramu Fe-C. Vhodnější je uvádět ternární soustavu Fe-C-Si. Nejvýznamnějšími chemickými prvky obsaženými ve složení litiny s lupínkovým grafitem jsou: uhlík, křemík, mangan, fosfor a síra. Nelegovaná litina nemá normalizované chemické složení. Koncentrace prvků se volí podle požadovaných vlastností. V **tab. 1** se uvádí doporučené rozmezí chemického složení, uhlíkových ekvivalentů (CE) a mechanických vlastností. Barevně zvýrazněná litina EN-ČSN-GJL-200 byla hodnocena v experimentální části vlastní bakalářské práce. [1] [8]

Tab. 1 *Vlastnosti a složení nelegovaných litin s lupínkovým grafitem (na odděleně lité tyči ø 30 mm) [1]*

	EN-ČSN-GJL-100	EN-ČSN-GJL-150	EN-ČSN-GJL-200	EN-ČSN-GJL-250	EN-ČSN-GJL-300	EN-ČSN-GJL-350
R _m [MPa]	100 – 200	150 – 250	200 – 300	250 – 350	300 – 400	350 – 450
HB _{max} ⁽¹⁾	180	200	220	240	260	270
S _E	1,05 – 1,11	0,99 – 1,05	0,93 – 0,99	0,87 – 0,93	0,81 – 0,87	0,75 – 0,81
Chem.sl.[%] ⁽²⁾						
C	3,5 – 3,7	3,4 – 3,6	3,3 – 3,5	3,1 – 3,3	3,0 – 3,2	2,8 – 3,1
Si	2,3 – 2,5	1,9 – 2,2	1,8 – 2,1	1,7 – 1,9	1,6 – 1,8	1,5 – 1,7
Mn	0,4 – 0,6	0,5 – 0,7	0,6 – 0,8	0,8 – 1,0	0,9 – 1,1	1,1 – 1,3
P _{max}	0,7	0,6	0,5	0,5	0,3	0,25
S _{max}	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
doporučená tl. stěn [mm]	4 – 15	5 – 30	8 – 45	15 – 70	25 – 100	40 – 150 i více
struktura	ferit + stopový perlit	ferit + perlit	ferit + perlit	ferit + perlit	perlit	perlit

(1) – uvedené tvrdosti jsou pouze orientační

(2) – chemické složení není normalizováno

Z **tab.1** vyplývá, že s klesajícím obsahem uhlíku a křemíku klesá stupeň eutektičnosti a naopak roste pevnost a tvrdost. S rostoucí pevností litiny se zvyšuje doporučená tloušťka stěny odlitku. Vyšší pevnosti litiny je také dosahováno zvyšováním koncentrace manganu a zvyšováním podílu perlitu ve struktuře.

Struktura litiny s lupínkovým grafitem

Struktura litiny je tvořena kovovou maticí a grafitem. Grafit je ve skutečnosti prostorový útvar, připomínající tvarem hlávkový salát. Na metalografickém výbrusu se jeví jako lupínky (**obr. 2**). Struktura litiny bývá nejčastěji feriticko-perlitická nebo čistě perlitická.

Chemické složení litiny se volí podle požadovaných vlastností. Změnou koncentrací uhlíku a křemíku se docílí změna stupně sycení a tím i změna mechanických a technologických vlastností litiny. Složení litiny, respektive poloha vůči eutektickému bodu, se počítá buď pomocí uhlíkového ekvivalentu (1):

$$CE = \%C + 1/3 (\%Si + \%P) \quad (1)$$

nebo stupně sycení, ze které lze stanovit, zda jde o eutektoidní, podeutektoidní nebo nadeutektoidní litinu (2).

$$S_c = \frac{\%C}{4,3 - 0,312 \%Si - 0,275 \%P} \quad (2)$$

Nadeutektické litiny mají $S_c > 1$ a $CE > 4,25 \%$, eutektické litiny mají $S_c=1$ a $CE=4,25 \%$; podeutektické litiny mají $S_c < 1$ a $CE < 4,25 \%$ [1] [8].



Obr. 2 Litina s lupínkovým grafitem s feriticko-perlitickou matricí [8]

Vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem

Vlastnosti litiny závisí především na tvaru, rozložení a velikosti vyloučeného grafitu. Množství grafitu závisí na obsahu uhlíku, křemíku a také na rychlosti chladnutí v průběhu tuhnutí. Rychlost chladnutí závisí na tloušťce stěny odlitku a materiálu formy. Grafit ve tvaru lupínků dělá z litiny křehký materiál. Jeho ostré konce lupínků jsou koncentrátoři napětí. Díky tomu mají litiny s lupínkovým grafitem minimální tažnost.

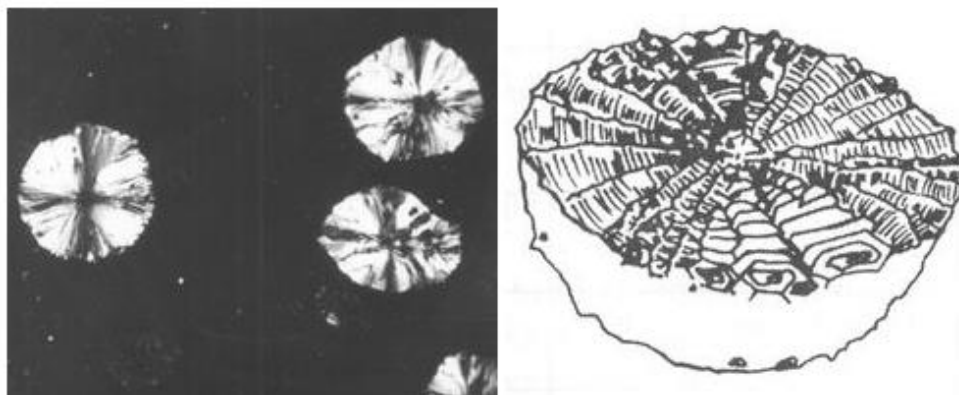
Naopak kladnou vlastností lupínků je výborné tlumení vibrací, skvělá tepelná vodivost a dále snižují citlivost litiny na účinek vrubů. Další pozitivní vlastností litiny s lupínkovým grafitem je výborná zabíhavost a malé smršťování materiálu při tuhnutí. Výrobní nenáročnost z ní také dělá velmi levnou litinu. Litina má výborné kluzné vlastnosti, proto se používá např. pro výrobu kluzných ložisek. [8]

2.3. Litina s kuličkovým grafitem (LKG)

Struktura

Litina s kuličkovým grafitem, nazývaná dříve také tvárná litina, je litina s grafitem vyloučeným ve formě kuliček, jak již bylo výše zmíněno. Obvyklá struktura litiny s kuličkovým grafitem je feriticko-perlitická či pouze feritická. Méně často jsou v praxi vyráběny litiny s čistě perlitickou strukturou. Na tvorbě grafitu ať už u litiny s kuličkovým či lupínkovým grafitem má velký vliv mimo uhlíku a železa také křemík a kyslík. Podílí se na tvorbě nukleačních zárodků grafitu a ovlivňuje povrchové napětí v tavenině při růstu grafitu. Množství a tvar grafitu v litině

se ovlivňují pomocí očkování a modifikace. Aby se zabránilo vzniku nežádoucích karbidických fází (ledeburit, a sekundární cementit), by se měl stupeň syčení pohybovat mezi 0,98 – 1,05. Uhlíkový ekvivalent by měl být v rozmezí od 4,2 % do 4,4 %. [1] [8]



Obr. 3 Zrna grafitu v litině s kuličkovým grafitem (vlevo), strukturní model (vpravo) [8]

Očkování

Očkování znamená přidávání takových látek do taveniny, které způsobí vznik zárodků pro krystalizaci grafitu. Provádí se při výrobě všech grafitických litin. Očkování však neznamená přidávání zárodků do taveniny, ale znamená interakci očkovačů s taveninou. Díky většímu počtu zárodků se grafit vyloučí ve struktuře odlitku rovnoměrně a je jemnější. Pokud má litina jemnější strukturu, má obvykle lepší mechanické vlastnosti než hrubozrnná litina. Pokud je však grafit jemný příliš, má litina sklon ke kašovitému tuhnutí vedoucímu k pórovitosti odlitků. [1] [8]

Modifikace litin

Modifikace litiny je proces změny tvaru grafitu na kulovitý tvar. Provádí se hořčíkem a jeho slitinami. Jelikož má hořčík teplotu vypařování 1107 °C, při teplotách modifikace se vypařuje. Dochází k bouřlivé reakci, která způsobuje rozstříkávání kovu. Modifikuje se předslitinami FeSiMg nebo NiMg. Modifikace nejčastěji probíhá tak, že se modifikátor nasype na dno pánve, zasype se ocelovými plíšky či šponami a zalije se taveninou. Zасыпáním modifikátoru se oddaluje reakce hořčíku až do určitého zaplnění pánve taveninou, čímž se bouřlivost reakce snižuje. Hořčíkové páry začnou probublávat ode dna vzhůru pánví s taveninou. Hořčík v tavenině reaguje se sírou a kyslíkem a tvoří chemické sloučeniny - sulfidy a oxidy. Dochází ke změně povrchového napětí taveniny. Vyšší povrchové napětí na rozhraní tavenina grafit podporuje vznik kuličkového grafitu. Na vznik kuličkového grafitu má vliv pouze hořčík rozpuštěný v tavenině. Jeho koncentrace musí být minimálně 0,03 %. [1]

Vlastnosti

Vlastnosti litiny se odvíjí od velikosti, množství grafitu a poměru feritu a perlitu ve struktuře. Dále závisí na koncentraci prvků jako jsou mangan a měď (podporují vznik perlitu) a na koncentraci křemíku (podporuje vznik křemíku). Důležitá je také tloušťka stěny odlitku a materiál formy, který ovlivňuje odvod tepla při tuhnutí. Pevnost v tahu se u litin s kuličkovým grafitem pohybuje od 350 do 900 MPa. Tažnost litin s kuličkovým grafitem se pohybuje od 2 do 22 %. [8]

Tab. 2 Mechanické vlastnosti nelegovaných LKG na odděleně litých zkušebních tělesech [1]

Označení materiálu	Pevnost v tahu R_m	Mez 0,2 $R_{p0,2}$	Tažnost A_{5min}	Tvrdost 4)	Struktura	Pozn.
	[MPa]	[MPa]	[%]	[HB]		1)
EN-GJS-350-22	350	220	22	< 160	F	2)
EN-GJS-400-18 (15)	400	250	18 (15)	130 – 175	F	
EN-GJS-450-10	450	310	10	160 – 210	F	
EN-GJS-500-7	500	320	7	170 – 230	F + P	
EN-GJS-600-3	600	370	3	190 – 270	P + F	
EN-GJS-700-2	700	420	2	225 - 305	P	
EN-GJS-800-2	800	480	2	245 - 335	P, S	
EN-GJS-900-2	900	600	2	270 - 360	B, S	3)

- 1) Dále varianty se zaručenými vlastnostmi za nízkých teplot
- 2) Varianty s tažností 15 a 18 % a dále varianty se zaručenými vlastnostmi za nízkých teplot
- 3) Lze dosáhnout pouze tepelným zpracováním a/nebo legováním
- 4) Tvrdost na přilítých zkušebních tělesech

Struktura: F – ferit, P – perlit, S – sorbit, B – bainit

3. DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ

Pro zjištění potřebných vlastností materiálu se často používají destruktivní zkoušky. Díky těmto zkouškám se může kvalitativně vyjádřit chování materiálu pod vlivem vnějších působících sil a případně i jiných vnějších působení. Tím se volí použití materiálu z pohledu technologických i ekonomických parametrů. [7] [9]

3.1. Zkouška tahem

Jednou z nejdůležitějších a nejčastěji prováděných statických zkoušek je zkouška tahem. Je vyžadována u většiny strojírenských materiálů a to proto, že určuje důležité informace o zkoušeném vzorku, a to mez pevnosti R_m , mez kluzu R_e , smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, tažnost A , a kontrakci Z . Zkouška se provádí na trhacím stroji, kde je umístěna zkušební tyč, a stroj zaznamenává prodloužení vzorku v závislosti na působící síle F . Výsledkem zkoušky je graf závislosti napětí na deformaci. [7] [9]

Mez kluzu R_e , $R_{p0,2}$

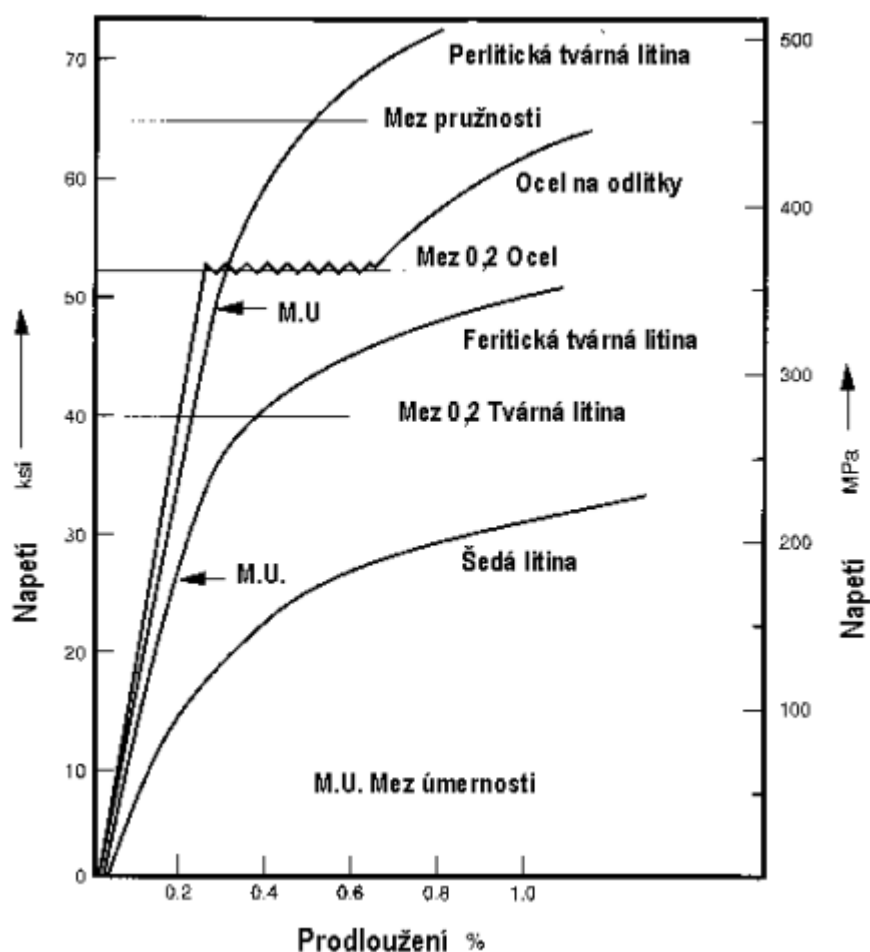
Mezi kluzu R_e , se nazývá napětí, při kterém v materiálu dochází k prvnímu pohybu dislokací, což má za následek vznik trvalé plastické deformace. Grafické litiny nemají výraznou mez kluzu, proto se u nich určuje takzvaná smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, která se stanovuje, když napětí způsobí trvalou plastickou deformaci o velikosti $\varepsilon_p = 0,2 \%$. [7] [9]

Smluvní diagram napětí – deformace

Výsledkem zkoušky je diagram závislosti prodloužení na síle. Pro grafitické litiny a další materiály je diagram zobrazen na **obr. 4**. Dále je možné přepočítat pomocí smluvních vztahů na diagram smluvního napětí na poměrné deformaci dle vzorců pro smluvní napětí (3) a smluvní poměrnou deformaci (4) [7]:

$$R_i = \frac{F_i}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

$$\varepsilon_i = \frac{(L_i - L_0)}{L_0} [-], \varepsilon_i = \frac{(L_i - L_0)}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (4)$$



Obr. 4 Tahový diagram různých materiálů [9]

Mez pevnosti R_m

Mezí pevnosti se nazývá bod na smluvním diagramu napětí – deformace, který je maximální hodnotou napětí. Vzorec pro výpočet meze pevnosti je zlomkem maximální zatěžovací síly dosažené během zkoušky, která se dělí původním průřezem zkoušené tyče. [10] [9]

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

Výpočet tažnosti A, a kontrakce Z

Tažnost a kontrakce se vypočte z jednoduchých vztahů, kde tažnost se počítá jako trvalá změna délky (prodloužení) – ($L_u - L_0$), vydělená původní délkou tyče L_0 .

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

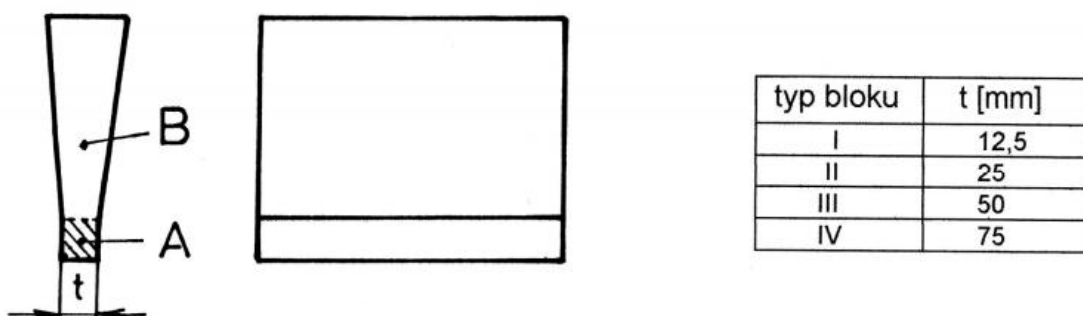
Kontrakce neboli zúžení se vypočítává ze změny průřezu zkušební tyče ($d_u - d_0$), dělenou původním průřezem d_0 . [7]

$$Z = \frac{d_u - d_0}{d_0} \cdot 100 [\%] \quad (7)$$

U litiny s lupínkovým grafitem je tažnost minimální. Důvodem jsou ostré konce lupínkového grafitu, které jsou koncentrátory napětí. U litiny s kuličkovým grafitem se pohybuje tažnost od 2 do 22 %, v závislosti na struktuře. Feritická struktura má vyšší tažnost, ale nižší mez pevnosti a tvrdost. Feriticko-perlitická struktura má mez pevnosti od 500 do 600 MPa s tažností kolem 6 až 12 %. Litina s kuličkovým grafitem s nejnižší tažností má strukturu bainitickou a má pevnost v tahu až 900 MPa. [1] [8]

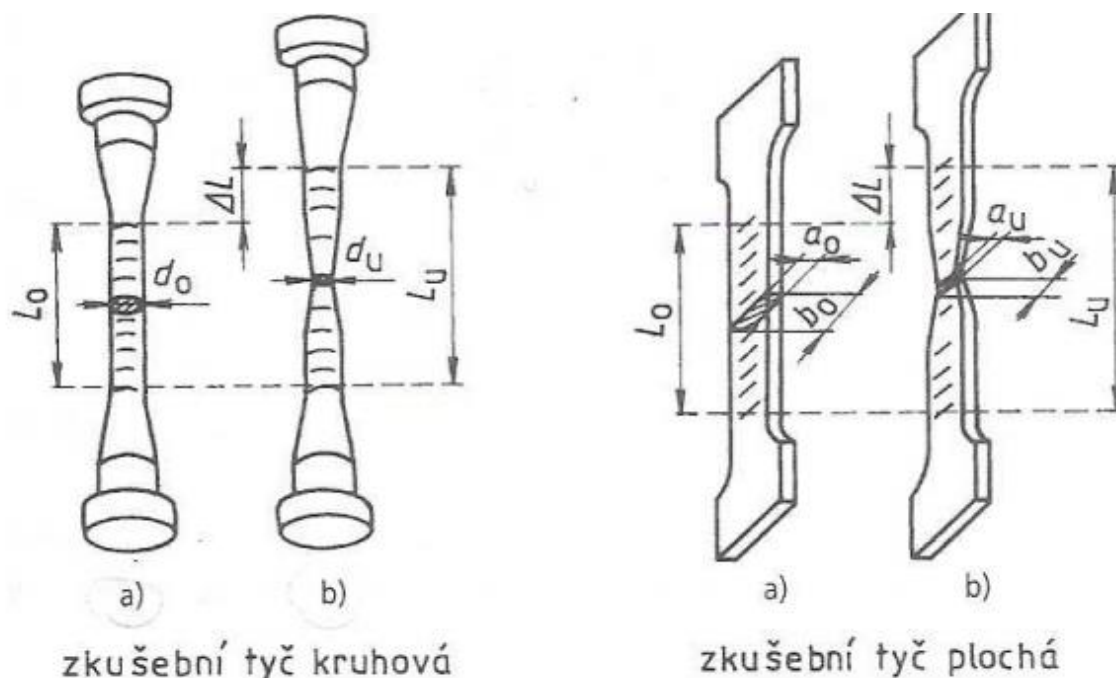
Zkušební tyče

Pro tahové zkoušky se nejčastěji používají jako zkušební tělesa válcové tyče. Pro litinu s lupínkovým grafitem se vyrábí obráběním z odděleně litých tyčí. Z litiny s kuličkovým grafitem se odlévají tzv. Y bloky. Po odřezání spodní části vznikne kvádr, ze kterého se poté obráběním vyrábí zkušební tělesa. [6]



Obr. 5 Zkušební těleso ve tvaru Y

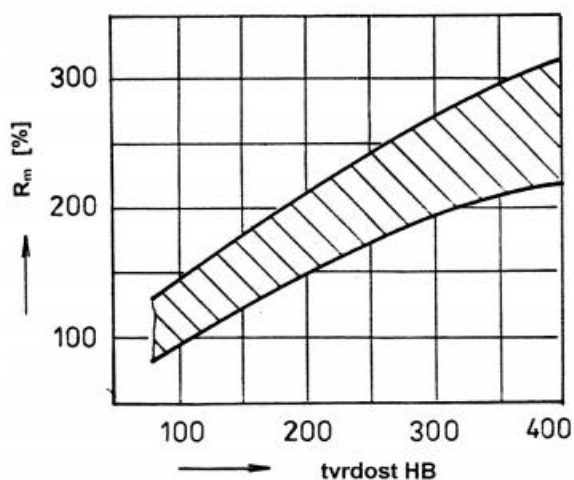
Ploché zkušební tyče se používají většinou pro plechy. Během zkoušky se sleduje prodloužení Δl a zúžení ve směru os x i y.



Obr. 6 Zkušební tyče pro statickou zkoušku tahem [11]

3.2. Zkoušky tvrdosti

Velmi důležitou a zároveň levnou a rychlou zkouškou v provozu je zkouška tvrdosti. Zkouška pomáhá určit mechanické vlastnosti zkoušeného tělesa a jeho materiálu. Principem všech zkoušek tvrdosti je vnikání tělíska (indentoru) do povrchu materiálu, a vyhodnocení plochy vtisku podle etalonu. Hlavní výhodou těchto zkoušek je to, že se nemusí vyrábět zkušební tělesa. Zkouška se může provádět buď přímo na součásti, nebo na již použité zkušební tyči na tahovou zkoušku. Tvrdost predikuje mechanické vlastnosti litiny, zejména její mez pevnosti. Pro nelegovanou litinu s lupínkovým grafitem má závislost meze pevnosti na tvrdosti přímou úměrnost viz **obr. 7**. Na základě naměřené pevnosti lze velmi dobře predikovat pevnost litiny s lupínkovým grafitem s feritickou, feriticko-perlitickou až perlitickou strukturou. [1] [7]



Obr. 7 Závislost tvrdosti v HB na mezi pevnosti u LLG [1]

Rozdělení zkoušek tvrdosti

Zkoušky tvrdosti dělíme na zkoušky makrotvrdosti a mikrotvrdosti. Zkoušky makrotvrdosti se dělí podle rychlosti zatěžování na statické a dynamické. Nejznámější jsou statické zkoušky vnikací a to zkoušky dle Brinella, Vickerse a Rockwella. Méně známé jsou např. zkoušky vrypové. Dynamické zkoušky se dělí na plasticky nárazové a elasticky odrazové. Nejznámější dynamickou zkouškou je plasticky nárazová metoda Poldiho kladívkem. Zkoušky mikrotvrdosti jsou pouze statické, vnikací a jsou to metody dle Knoop a výše zmíněná metoda dle Vickerse. Zkouška dle Brinella je vhodná pro měkké a středně tvrdé materiály, a proto se používá pro měření tvrdosti grafitických litin. [14]

Tab. 3 Rozdělení zkoušek tvrdosti [14]

Zkoušky makrotvrdosti	Statické	Vrypové	Metoda Martensova
		Vnikací	Metoda Brinell
			Metoda Vickers
			Metoda Rockwell
	Dynamické	Plastické nárazové	Poldi kladívko
			Baumannovo kladívko
		Elastické odrazové	Shoreho skleroskop
Zkoušky mikrotvrdosti	Statické	Vnikací	Duroskop
			Metoda Vickers
			Metoda Knoop

3.2.1. Zkoušení tvrdosti dle Brinella

Jako indenter se nejčastěji používá ocelová kulička či kulička z tvrdokovu. Indenter vniká do povrchu zkoušené součásti za předepsaných podmínek zatěžování a doby působení. Po uplynutí zadané doby zatěžování se zkoušený vzorek odlehčí a na součásti zůstane trvalý vtisk. Průměr vtisku se změří pomocí optických zařízení (**obr 8**). Vzorec pro výpočet tvrdosti HB (8) [15] [16]:

$$HB = \frac{0.102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d_0^2})} \quad (8)$$

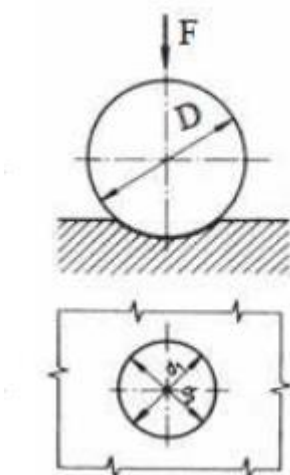
- D je průměr indentoru [mm]
- d_0 je střední průměr vtisku, vypočtený jako průměrná hodnota d_1 a d_2 [mm]
- F je zatěžující síla [N]. [15] [16]

Aby se nemusela síla vypočítávat z výše uvedeného vztahu, existují tabulky, podle kterých se po změření průměru vtisku, rovnou určí hodnota HB pro určitý průměr indentoru. [15]

Nejčastější průměry D se používají 10; 5; 2,5; 2; a 1 mm. Dalším kritériem ke korektnímu proběhnutí zkoušky je předepsaná tloušťka tělesa, která nesmí být menší nežli desetinásobek hloubky vtisku. Tím je zaručeno, že plastická deformace bude pouze ve zkušebním vzorku. [15]

Tvrdosti u litiny s lupínkovým grafitem se pohybují podle struktury od 150 do 270 HB viz **tab. 4**. Litiny s kuličkovým grafitem mají tvrdosti dle struktury v rozmezí od 160 do 360 HB. Hodnoty tvrdostí pro jednotlivé jakosti litin s kuličkovým grafitem jsou uvedeny v **tab. 5**. Existují i tvrdší litiny s kuličkovým grafitem, než jsou uvedeny v **tab. 5**, ale ty obsahují

ve struktuře bainit či sorbit. Tato bakalářská práce se věnuje litině s kuličkovým grafitem s feritickou, feriticko-perlitickou až perlitickou strukturou. [15]



Obr. 8 Zkouška tvrdosti podle Brinella [12]

Tab. 4 Tvrdost a struktura nelegovaných LLG (na odděleně lité tyči $\varnothing 30$ mm) [1]

	EN-ČSN-GJL-100	EN-ČSN-GJL-150	EN-ČSN-GJL-200	EN-ČSN-GJL-250	EN-ČSN-GJL-300	EN-ČSN-GJL-350
HB _{max}	180	200	220	240	260	270
Struktura	ferit + stopy perlitu	ferit + perlit	ferit + perlit	perlit + ferit	perlit	perlit

Tab. 5 Tvrdost a struktura nelegovaných LKG na přilíých zkušebních tělesech [1]

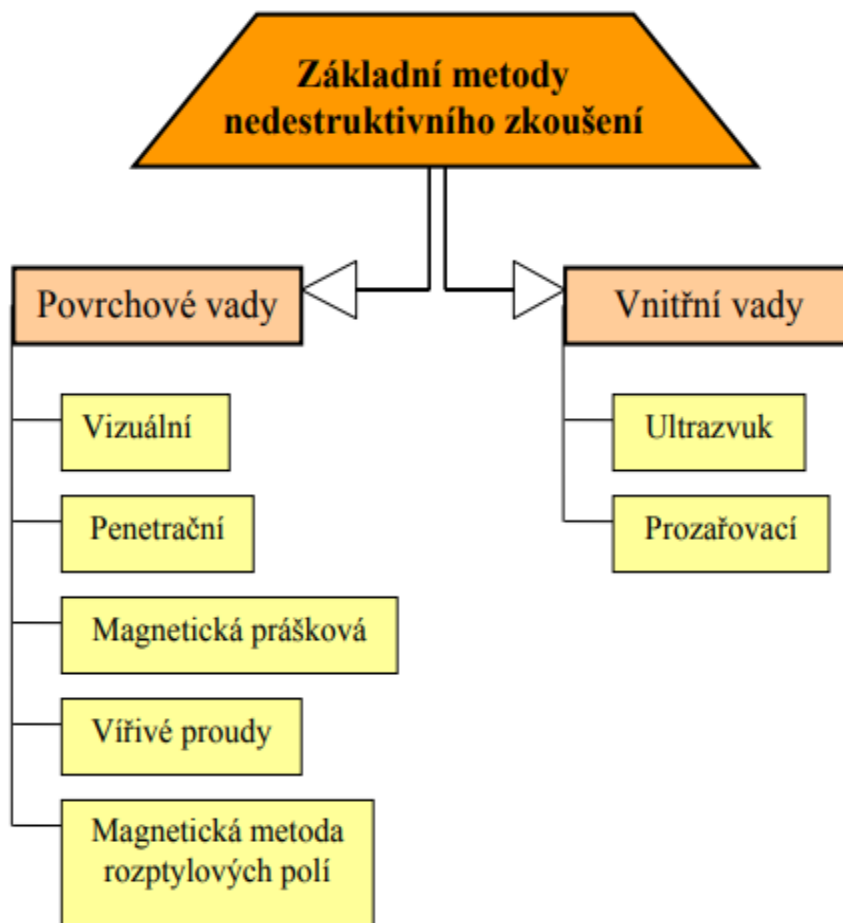
	EN-ČSN-GJS-350-22	EN-ČSN-GJS-400-18(15)	EN-ČSN-GJS-450-10	EN-ČSN-GJS-500-7	EN-ČSN-GJS-600-3	EN-ČSN-GJS-700-2
HB	< 160	130-175	160-210	170-230	190-270	225-305
Struktura	ferit	ferit	ferit	ferit + perlit	perlit + ferit	perlit

4. NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ VNITŘNÍCH VAD MATERIÁLU

Mimo destruktivní zkoušky patří neodmyslitelně do průmyslové praxe nedestruktivní zkoušení materiálu (NDT – non-destructive testing). Zahrnuje mnoho metod — od jednoduchých vizuálních metod zkoumání povrchových vad, až po sofistikovanější kontrolu vad uvnitř materiálu, například pomocí rentgenového záření. Nedestruktivní zkoušení má oproti destruktivnímu dvě hlavní výhody. První je, jak název napovídá, že zkoušené těleso zůstává zachováno a na konci zkoušky je zachována jeho celistvost a jeho užité vlastnosti se nemění. Druhou výhodou je, že většinou není potřeba vyrábět zkušební vzorky a kontrola probíhá buď přímo na součásti, nebo na použitém zkušebním vzorku, vyrobeném pro jiné zkoušky — například použité tyče na tahové zkoušky.

Hlavní dělení zkoušek spočívá v charakteru vady, která je buď vnitřní nebo povrchová. Podle toho se volí metoda zkoušení. Nutno podotknout, že v praxi se nevyužívá pouze jedna

metoda, ale zpravidla kombinace různých metod. V této práci budou podrobněji popsány pouze metody ultrazvukem a rentgenové, které jsou součástí experimentální části této bakalářské práce. [17] [18]



Obr. 9 Rozdělení základních metod nedestruktivního zkoušení [13]

4.1. Zkouška ultrazvukem

Fyzikálním principem této zkoušky pro testování vnitřních vad je vlnění. Vlnění znamená vibraci částic v prostoru okolo jejich rovnovážných bodů. Je založeno na silách soudržnosti, které mají částice mezi sebou, a proto se kmity přenáší v podobě vlny, šířící se určitou rychlostí v daném prostředí. Slyšitelné vlnění (také nazývané slyšitelným zvukem) se pohybuje v rozmezí frekvencí od 16 Hz do 20 kHz. Infrazvuk se nazývá vlnění, které má frekvenci do 16 Hz. Vlna, která má frekvenci nad pásmem slyšitelnosti (nad 20 kHz), je ultrazvuk. Vlnění, které má frekvenci nad 100 kHz, se šíří ve svazcích a má schopnost se lámat, odrážet a ohýbat. Při zkoušení strojních materiálů pomocí ultrazvuku se však využívají mnohem vyšší frekvence vlnění, řádově MHz. Takové vlnění se ve vzduchu nešíří z důvodu velmi výrazného tlumení. Šíří se ale v pevných látkách, a tudíž je možno pozorovat vady i hluboko pod povrchem. [17]

Základní druhy ultrazvukových vln

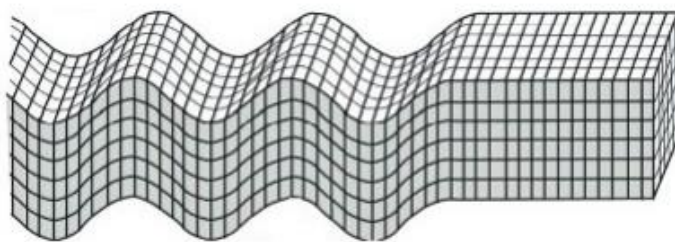
Částice prostředí, kterým prostupuje vlna, mohou tuto vlnu šířit mnoha způsoby. Ve dvojrozměrném prostoru se mohou částice pohybovat buď příčně, nebo podélně. Při šíření

příčných vln vznikají tlakové a tahové síly z důvodu přibližování a oddalování částic. Takovéto šíření vln nastává v materiálech dostatečně pružných, tuhých, kapalných i v plynném prostředí. Rychlost šíření příčné vlny se označuje c_L . [17]



Obr. 10 Příčné vlnění [17]

Druhý typ vlnění se nazývá podélné. To se vyznačuje kmitáním částic kolmo na směr šířící se vlny, při zachování stejného směru pohybu ve směru vlny. Tento druh vlnění se šíří pouze v materiálech přenášející smykové síly. Tudíž se toto šíření vyskytuje pouze uvnitř tuhých látek. V kapalinách či plynech není možné přenášet smykové síly. Na rozdíl od příčné vlny je rychlost šíření vlny vždy menší a označujeme ji c_T . [17] [18]



Obr. 11 Podélné vlnění [17]

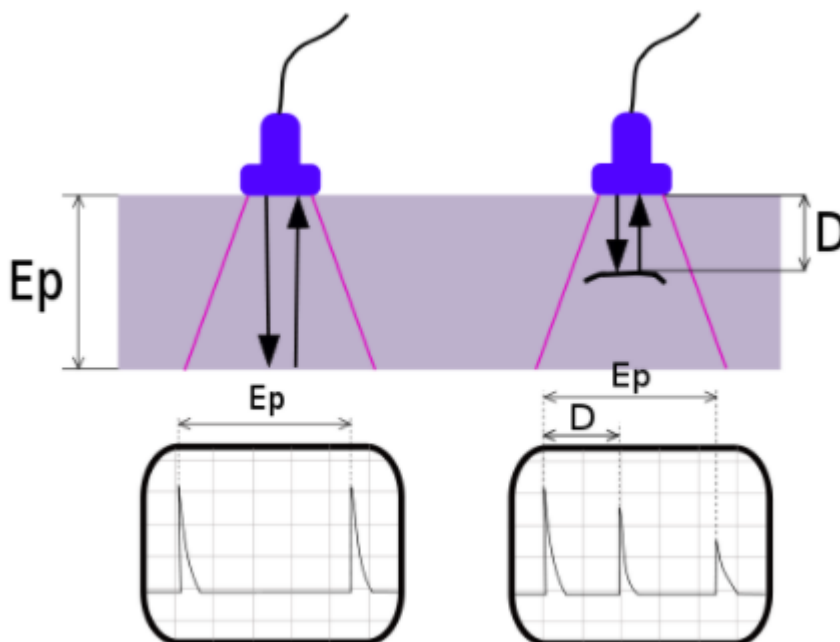
4.1.1. Základní metody zkoušení ultrazvukem

4.1.1.1. Odrazová metoda

Principem této metody je vyslání ultrazvukového impulsu skrze sondu a ten se začne odrážet jak od povrchu tělesa, tak i od vnitřních vad. Většinou je použita jedna sonda na vysílání i přijímání odražených impulsů. Přijímací sonda mění ultrazvukový impuls na elektrický, a vyobrazuje jej přímo na obrazovce. Pomocí znalosti tloušťky materiálu, je možné zjistit hloubku vady. Podle údajů na obrazovce zjistíme, jak hluboko je vada pod povrchem sondy. Dokonce, při znalosti technologie výroby, lze z tvaru odražených ech odhadnout typ vady. Nevýhodou této metody je, že se vlna pohybuje dvojnásobnou vzdáleností, než je vzdálenost mezi povrchem a vadou. Dále se zde nachází tzv. mrtvé pásmo. To je pásmo těsně pod povrchem, ve kterém nelze sledovat vady. Minimální velikost mrtvého pásma je přibližně 1 mm při použití speciálních dvojitých sond. Šířku mrtvého pásma ovlivňuje mnoho faktorů:

- výkon vysílacího impulsu (čím vyšší výkon tím větší mrtvé pásmo)
- zvolené tlumení sondy (silně tlumené sondy mají kratší mrtvé pásmo)
- frekvence sondy (čím nižší frekvence, tím větší šířka mrtvého pásma)
- zesílení nastavené na přístroji (čím větší zesílení, tím větší mrtvé pásmo)

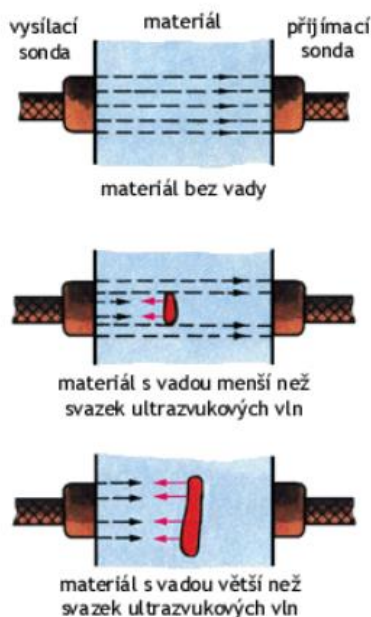
z těchto důvodů není výhodné používat ultrazvukové zkoušky na tenká tělesa. Na **obr. 12** je znázorněna odrazová metoda, kde se vada jeví jako pík na obrazovce zařízení. Znalostí vzdálenosti píků D je možné zjistit i hloubku a rozsah vady. [17]



Obr. 12 Testování materiálu pomocí odrazové metody [19]

4.1.1.2. Průchodová metoda

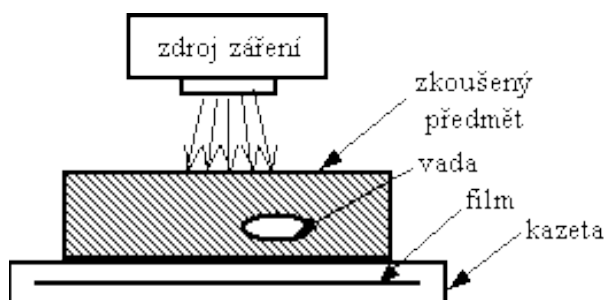
Tato metoda funguje na vysílání ultrazvukového impulsu skrz materiál a přijímání impulsu na druhé straně pomocí druhé sondy. Na rozdíl od odrazové metody je nutné použít dvě různé sondy (přijímací a vysílací). Pokud impuls narazí na vnitřní nečistost, sníží se počet přijímaných impulsů oproti místu, kde se vada nevyskytuje. Nevýhodou této metody je fakt, že není možné vadu lokalizovat, pouze je možné zjistit, zda se uvnitř vyskytuje či nikoliv. [17] [18]



Obr. 13 Princip ultrazvukové průchodové metody [18]

4.2. Prozařování

Tato metoda nedestruktivního zkoušení materiálu pracuje na principu prozařování materiálu rentgenovým paprskem. Schematicky je zobrazen na **obr. 14**. [17]



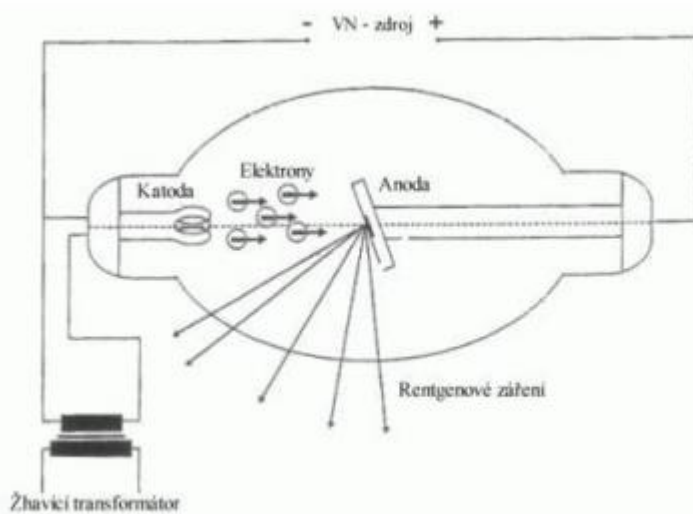
Obr. 14 Princip prozařovací metody [20]

Záření

Záření je energie, šířící se pomocí částic prostorem. Když se takto putující energie šíří pomocí vlnění, jedná se o vlnění elektromagnetické (rentgenové záření a gama záření). Tato práce bude blíže pojednávat o zářeních rentgenovém a gama. [17]

Záření X (rentgenové)

Jako záření rentgenové se označuje fotonové krátkovlnné záření, které vzniká v elektronovém obalu atomu. Toto záření vzniká změnou-li elektron svou energetickou hladinu, respektive přejde-li elektron z vyšší hladiny do nižší. Aby záření mohlo vzniknout, je zapotřebí zdroje elektronů, urychlovač elektronů a terčik pro zabrzdění elektronů urychlených. Rentgenové záření vzniká v zařízení, které se nazývá rentgenka. Toto zařízení obsahuje katodu s wolframovým vláknem, a to je žhaveno elektrickým proudem. Takto rozžhavené vlákno začne emitovat volně vázané elektrony, které se vysokým elektrickým proudem urychlují, a poté dopadají na wolframový terčik na anodě umístěné naproti katodě. Celé toto zařízení je umístěno ve skleněné uzavřené nádobě vyplněné vysokým vakuem. Nutno podotknout, že 99 % elektronů, dopadajících na terčik, se přemění na teplo a pouze 1 % se mění na rentgenové záření. [17]



Obr. 15 Schéma rentgenky [18]

Gama záření

Gama záření se od rentgenového liší především způsobem vzniku. Rentgenové záření vzniká při urychlování elektronů na katodě a jejich dopadem na terčik na anodě. Na rozdíl od toho, gama záření vzniká z několika ostře definovaných jaderných procesů. Oproti X-záření je gama záření větší a má tedy odlišné radiografické účinky. Pro nedestruktivní zkoušení materiálu pomocí gama záření se využívají zářiče Ir_{192} a Co_{60} . Pro porovnání, odpovídá Ir_{192} 200-612 keV a Co_{60} odpovídá energii záření přibližně 1170-1330 keV. [17] [18]

Princip prozařování

Principem zkoušky je rozdílnost absorpce záření, tudíž po prozáření je možné na speciální fólii umístěné pod vzorkem pozorovat tmavá a světlá místa (tmavší – vyšší absorpce, světlejší nižší absorpce). Prozařování se může použít takřka na jakémkoliv materiálu. Omezení způsobuje pouze tloušťka vzorku, protože může dojít k tomu, že záření neprojde skrz. [17]

5. METALOGRAFICKÁ ANALÝZA

Takovou analýzou je myšleno sledování metalografických vzorků pomocí mikroskopu, ať už optickým, světelným či speciálním metalografickým mikroskopem. Jednou z nejdůležitějších částí analýzy je správná volba místa odběru vzorku. Dále závisí na fixaci vzorku a jeho úprava, což umožňuje správné sledování struktury. Je také důležité dodržet daný postup výroby zkušebních vzorků, protože by mohlo dojít ke změně struktury na povrchu sledovaného vzorku. [21]

5.1. Makrostruktura

Makroskopicky se sledují hlavně povrchové vady, lomové plochy a makrostruktury. Většinou je nutnost vyrobít výbrus a zvýraznit strukturu vhodným způsobem. Výbrusy pro sledování makrostruktury se obvykle vyrábí z řezů velkých polotovarů či součástí. Například při sledování průběhu vláken u složitějších výkovků, rozložení vměstků a podobně.

Zhotovení makrovýbrusu spočívá obvykle v obroušení, případně v hrubém leštění. Makrostruktura se vyvolává použitím leptadla, které se nechává zpravidla působit déle k vyvolání hloubkového naleptání. K naleptání litin se většinou používá roztok 50 % kyseliny chlorovodíkové. Po naleptání se zviditelní necelistvosti, trhliny a větší vměstky. [21]

5.2. Mikrostruktura

V praxi není litina či kov dokonale homogenní, protože výsledky vlastností záviselých na struktuře velmi závisí na místě a způsobu odběru vzorku. Proto se musí odebrat reprezentativní vzorek, aby byly zkoumané vlastnosti vyhodnoceny správně, bez ovlivnění. Po odebrání vzorku následuje jeho poměrně pracovně náročná úprava, při níž je potřeba zamezit tepelnému či mechanickému ovlivnění mikrostruktury. Pro mikrostrukturu se volí vzorky menších velikostí, do 5 cm², ty se snadněji zpracovávají. Správné místo pro odběr vzorku je definováno normou ČSN 42 0304. [21]

Pro studium struktury se používá nejčastěji světelná a elektronová mikroskopie. Především se podle nich pozorují velikosti a tvary zrn, druhy fází a strukturních součástí, způsob jejich vyloučení atd. Sleduje se tedy povaha mikrostruktury. [7]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část bakalářské práce se zabývá vyhodnocením hodnot mechanických vlastností a výsledků mikrostrukturní analýzy. Dále bylo provedeno celkové zhodnocení kvality vybraných materiálů, včetně návrhu pro její další zlepšení. Zkoušky byly provedeny na odlitých vzorcích z materiálu ČSN-EN-GJL-200 a ČSN-EN-GJS-400-15.

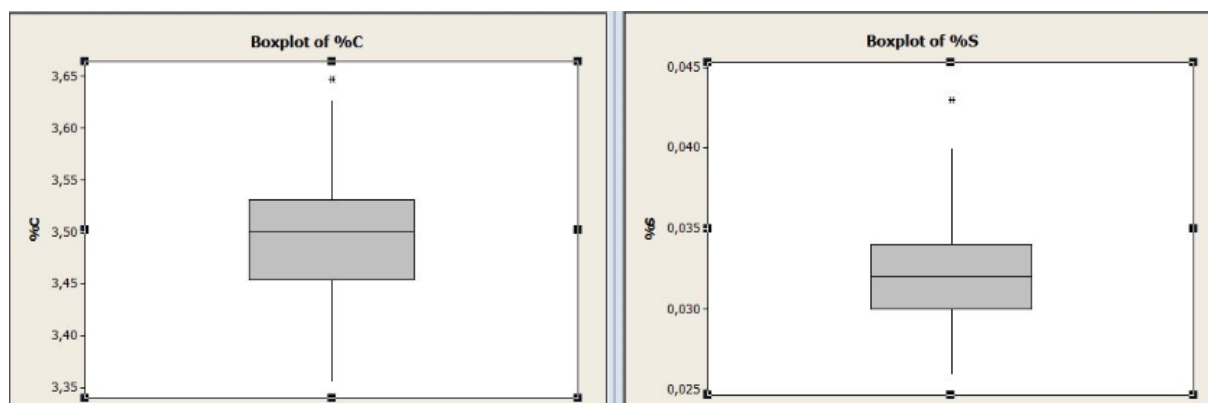
6. VYHODNOCENÍ CHEMICKÉHO SLOŽENÍ

Chemické složení se zjišťuje spektrálně. Koncentrace všech prvků byly zjištěny pomocí spalovací analýzy. V rámci této práce se stanovovalo chemické složení na spektrometru Q4 Tasman od firmy BAS Rudice s.r.o. z takzvaných 'penízků' odlitých z pece či z pánve. Pro spektrální analýzu bylo nutné zajistit bíle ztuhlé vzorky. To se zajistilo odlitím do měděné kokily, která zajistí vysokou rychlost ochlazování během tuhnutí vzorku. V této bakalářské práci se hodnotí vzorky lité v prvním pololetí roku 2018.

6.1. Litina s lupínkovým grafitem

Jak již bylo výše zmíněno, optimální složení litiny s lupínkovým grafitem ČSN-EN-GJL-200 je v **tab. 1**. Počet vzorků odlitých v prvním pololetí roku 2018 byl 105. Všechny obsahy chemického složení jsou uvedeny v příloze. Vyhodnocení vybraných prvků ve sledovaných tavebních se provedlo ve statistickém programu Minitab 15.

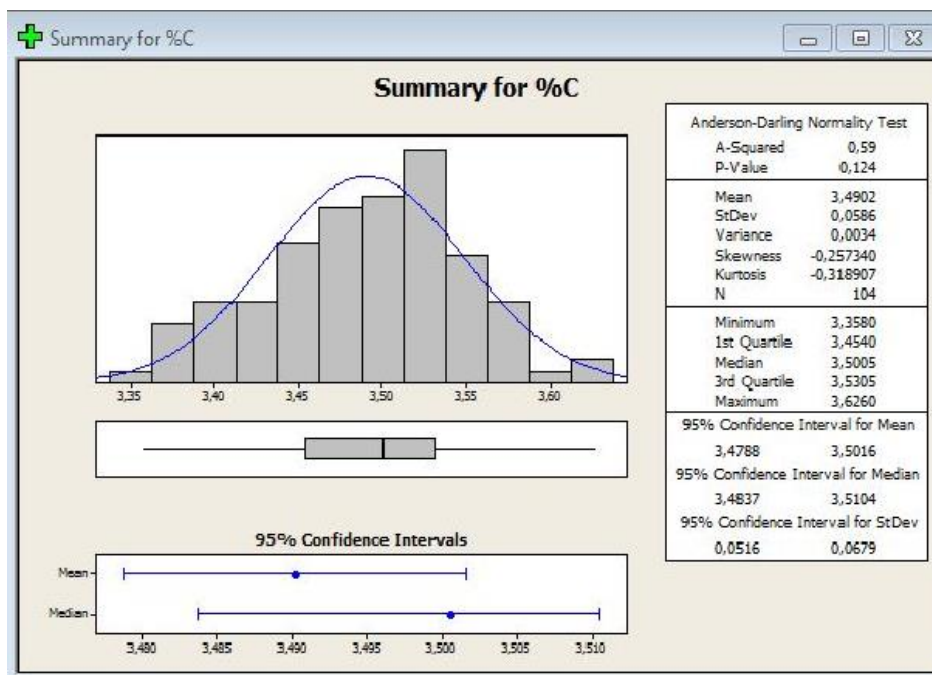
Jako první krok při třídění dat se provedlo vyloučení odlehlých pozorování (hrubé chyby). Tyto chyby byly odstraněny ze souboru pro hodnocení chemického složení a dále se pracovalo bez nich. U koncentrací uhlíku a síry byly nalezeny vždy po jedné odlehlé hodnotě (**obr. 16**).



Obr. 16 Vyhodnocení odlehlých chyb funkcí boxplot

Poté se pomocí programu Minitab vyhodnotily statistické charakteristiky, jako jsou rozsah statistického souboru, medián, minimum, maximum, směrodatná odchylka i 95 % intervalové odhady střední hodnoty, mediánu a směrodatné odchylky. Následně byla provedena i grafická analýza pomocí histogramů a regulačních diagramů.

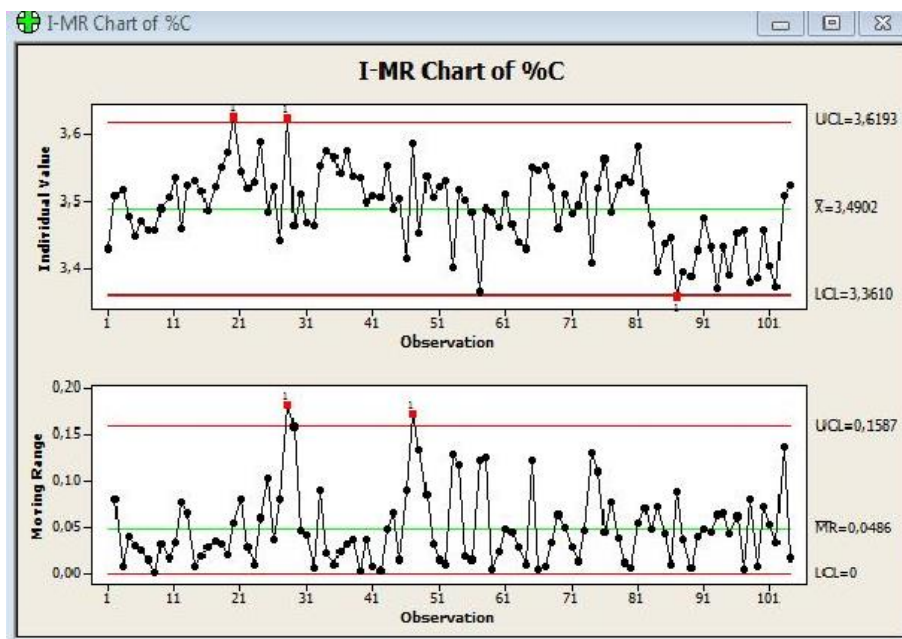
První statisticky hodnocený prvek byl uhlík. Celkový počet vzorků po vyloučení odlehlých hodnot byl 104 s průměrnou koncentrací 3,49 %. Minimální hodnota koncentrace z celého souboru byla 3,36 % a maximální 3,63 %. Hodnota mediánu byla vypočtena na 3,50 %. Intervalový odhad střední hodnoty uhlíku s 95 % spolehlivostí se pohyboval v rozmezí 3,48 % až 3,50 % (viz **obr. 17**).



Obr. 17 Vyhodnocení statistických charakteristik

Jak vyplývá z **obr. 17**, byl proveden i test normality Anderson-Darlingův. Rozložení koncentrace uhlíku u sledovaných taveb má normální rozdělení a p hodnota se rovná 0,124 (v **obr. 17** vpravo nahoře).

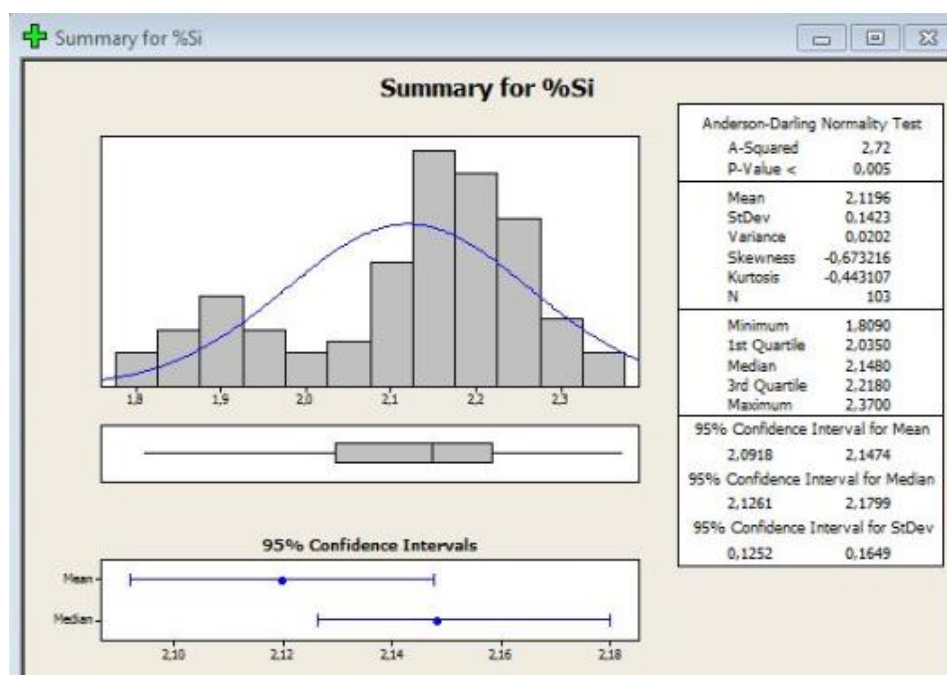
Poté se hodnotil chronologický trend obsahů uhlíku pomocí regulačních diagramů. Díky této funkci se dá zjistit časový průběh daného procesu nebo výsledku a použít jej k řízení procesu a analýze chyb během výroby. Při zkoumání obsahů uhlíku se zjistilo, že začátkem roku bylo množství v tavných optimální. Později začal obsah růst až nad horní centrální linii. Následně, zřejmě snahou o korekci se začala koncentrace postupně snižovat, až se časem dostala pod dolní hranici ohraničenou střední hodnotou – 3 σ (**obr. 18**).



Obr. 18 Vyhodnocení trendu obsahu uhlíku

Z údajů, získaných vyhodnocením obsahů uhlíku vyplývá, že aritmetický průměr koncentrací se blíží horní doporučené hranici 3,5 %, pro litinu GJL 200 dle [7]. Vyšší obsah uhlíku zajišťuje dobré podmínky odlévání, jako je zabíhavost a malé smršťování při tuhnutí. Naopak se může vysoká koncentrace uhlíku projevit negativně na mechanických vlastnostech. S rostoucím obsahem uhlíku klesá jak tvrdost, tak i mez pevnosti.

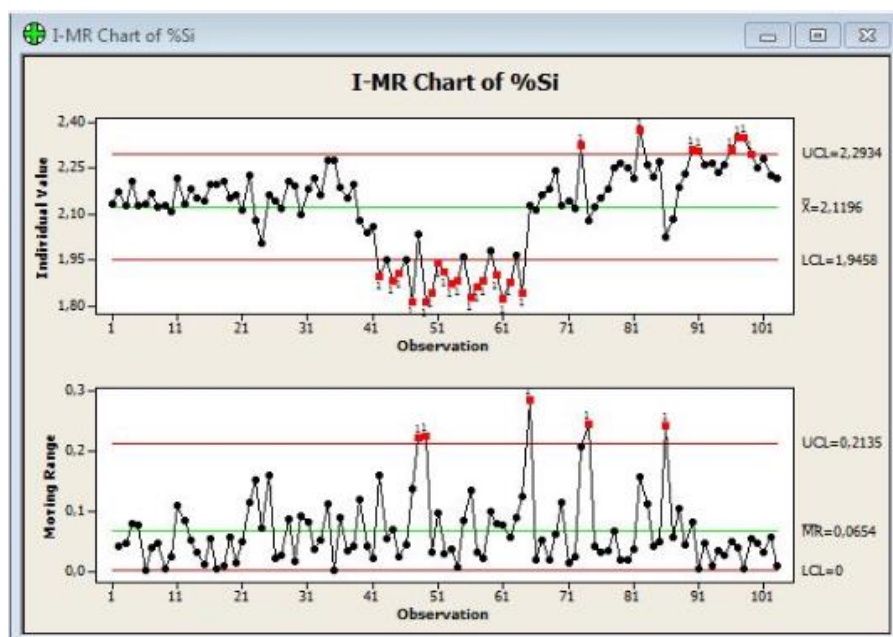
Dál se opět, pomocí programu Minitab, hodnotila koncentrace křemíku. Opět byl proveden test odlehlých chyb. Poté se vyhodnotily statistické charakteristiky v **obr. 19**. Bylo zjištěno, že průměrná hodnota obsahu byla 2,12 %. Minimum 1,81 % a maximum 2,37 %. Intervalový odhad střední hodnoty křemíku s 95 % spolehlivostí se pohyboval v rozmezí 2,09 % až 2,14 %. Hodnota medián byla 2,15 %. Jak ukázalo statistické hodnocení dat křemíku, nemají koncentrace křemíku na rozdíl od uhlíku normální rozložení hodnot. P hodnota Anderson-Darlingova testu normality měla hodnotu pouze 0,005.



Obr. 19 Vyhodnocení statistických charakteristik u křemíku

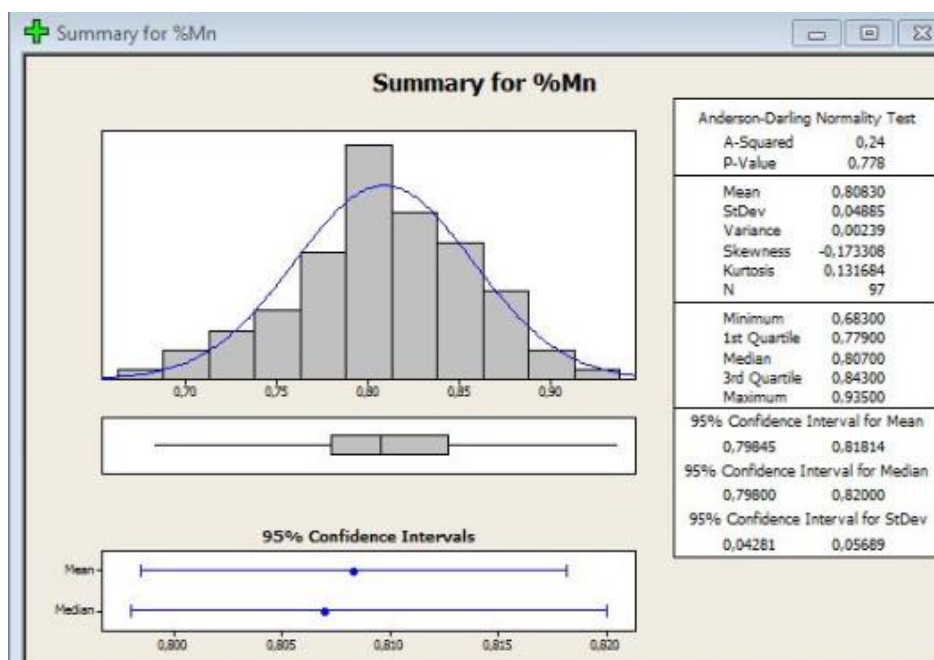
Podobně jako u uhlíku byl sledován trend obsahů, který byl seřazen chronologicky v regulačním diagramu. Ze začátku roku byl trend koncentrace uhlíku vyhovující. Postupem času se však začal obsah křemíku snižovat až pod centrální linii. Poté byla zřejmě snaha o kompenzaci skokově zvýšit obsah křemíku legováním nebo použitím většího podílu vratného materiálu. Obsah křemíku dále postupně narůstal až nad horní hranici vymezenou střední hodnotou a + 3 σ (**obr. 20**).

Aritmetický průměr křemíku byl 2,12 %, což je podle [1] mírně nad horní hranici doporučeného obsahu. Vyšší obsah křemíku má za následek feritizaci litiny a zvýšení stupně grafitizace. S rostoucím obsahem křemíku, stejně jako u uhlíku, se snižují prakticky všechny mechanické vlastnosti kromě dynamické houževnatosti.



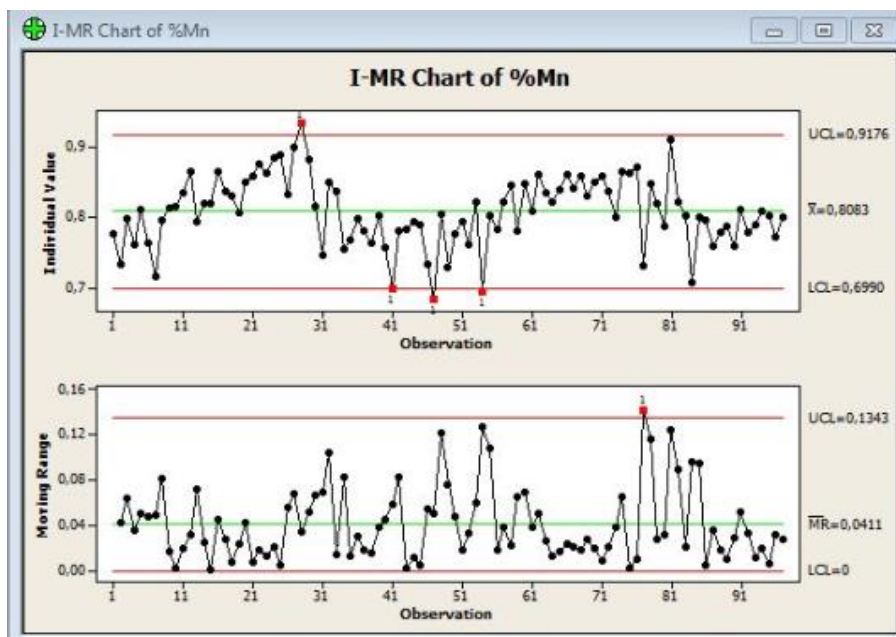
Obr. 20 Vyhodnocení trendu křemíku

Dalším prvkem hodnoceným pomocí programu Minitab byl mangan. Po provedení testu odlehklých pozorování se opět vyhodnotily statistické charakteristiky stejně jako u předchozích prvků. Průměrný obsah manganu ze všech 97 vzorků byl 0,81 %. Minimum bylo 0,68 % a maximum 0,94 %. Intervalový odhad středního hodnoty se s 95 % spolehlivostí pohyboval v rozmezí 0,79 % do 0,82 %. Hodnota mediánu byla 0,801 % (**obr. 21**). Rozložení koncentrací manganu dle Anderson-Darlingova testu normální rozdělení (p hodnota = 0,778).



Obr. 21 Vyhodnocení statistických charakteristik manganu

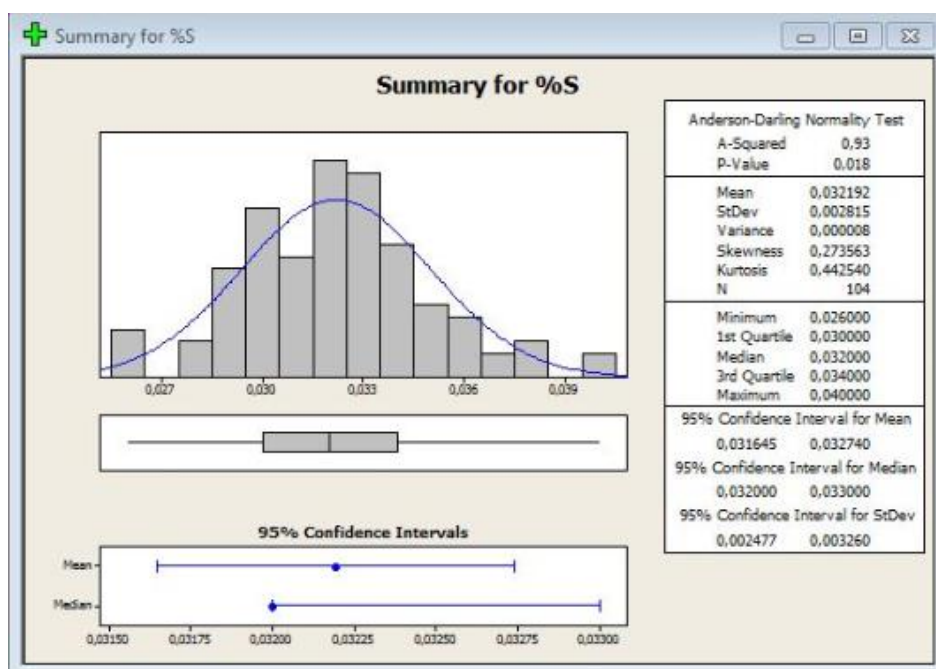
Vyhodnocením trendu obsahu manganu bylo zjištěno, že koncentrace manganu v průběhu taveb kolísá v rozmezí cca 0,70 až 0,90 %, což je pro výrobu litiny dané jakosti zcela vyhovující. Postupný nárůst a opět rychlý pokles naznačují operativní a správné zásahy pro korekci jeho obsahu (**obr. 22**). Na rozdíl od výše uvedených prvků je trend koncentrace manganu vyhovující.



Obr. 22 Vyhodnocení trendu obsahu manganu

Průměrný obsah manganu byl 0,81 %. Tato hodnota je mírně vyšší, než doporučuje literatura [1]. Vyšší obsah manganu zvyšuje pevnost při středním obsahu uhlíku (2,8 % až 3,4 %). Zhoršení mechanických vlastností klesá, když mangan způsobí zvýšení vázaného uhlíku za vzniku karbidů. [22]

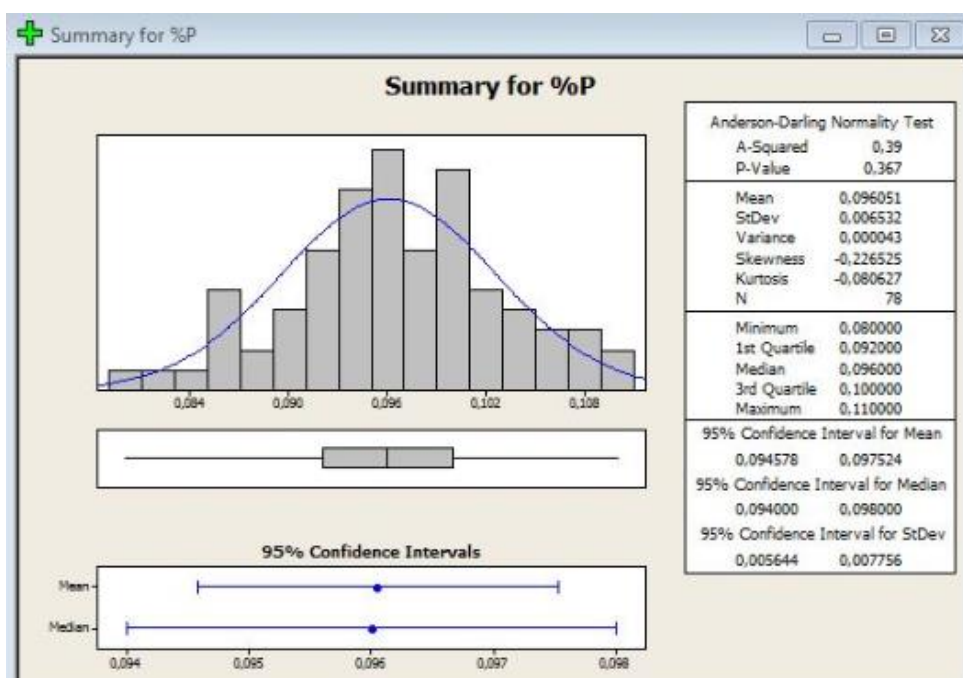
Dalším hodnoceným prvkem pomocí programu Minitab byla síra. Ze souboru byla vyloučena jedna odlehlá hodnota a vyhodnoceny statistické charakteristiky. Intervalový odhad střední hodnoty koncentrace síry s 95 % spolehlivostí se pohyboval od 0,032 % do 0,033 %. Minimum koncentrace síry bylo 0,026 %, maximum 0,040 % a medián byl 0,032 % (**obr. 23**).



Obr. 23 Vyhodnocení statistických charakteristik síry

Jak vyplývá z **obr. 23** a Anderson-Darlingova testu nemá rozložení koncentrace síry normální rozdělení. Literatura [1] doporučuje maximální obsah síry max. 0,15 %. Průměrný obsah síry byl pouze 0,032 %. Síra má sice nepříznivý vliv na vlastnosti litiny, snižuje pevnost a plasticitu, ale současně podporuje grafitizaci tvorbou zárodků pro růst grafitu. V dané koncentraci nebude mít významný negativní vliv na vlastnosti litiny a lze spíše doporučit její koncentraci zvýšit na cca 0,05 % až 0,07 %.

Posledním hodnoceným prvkem byl fosfor. Po vyloučení odlehlých chyb se opět jako u předešlých prvků hodnotily statistické charakteristiky pomocí programu Minitab. Rozložení koncentrace fosforu dle Anderson-Darlingova testu má normální rozdělení. Intervalový odhad střední hodnoty se spolehlivostí 95 % interval se pohybuje od 0,094 % do 0,098 %. Minimum a maximum koncentrace fosforu byly 0,08 %, respektive 0,11 % a hodnota mediánu činila 0,096 % (**obr. 24**).

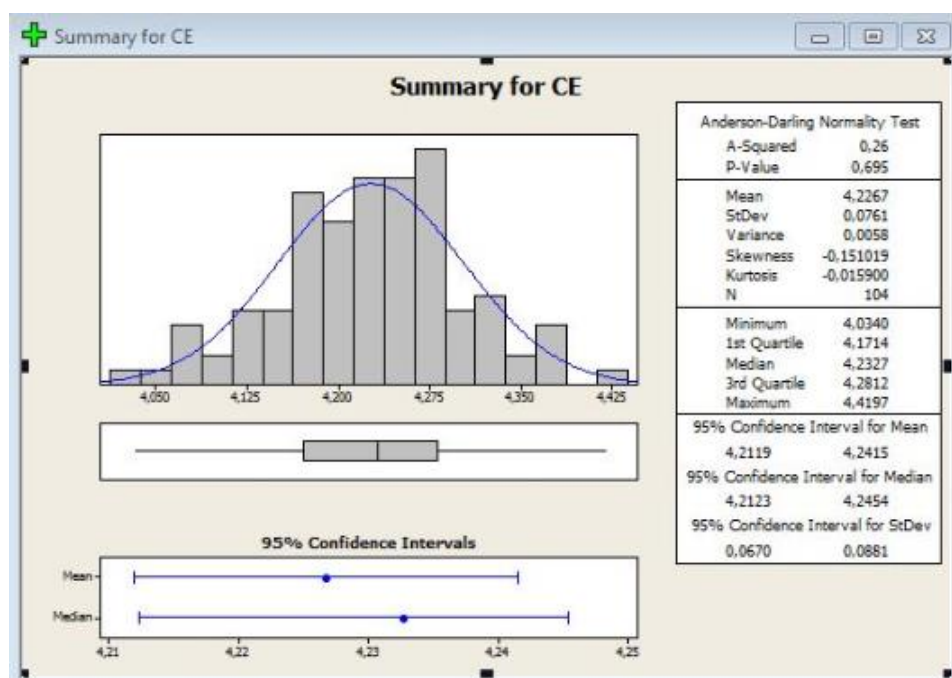


Obr. 24 *Vyhodnocení statistických charakteristik fosforu*

Fosfor působí nepříznivě na mechanické vlastnosti litiny při obsahu od 0,15 % až 0,2 %. Průměrný obsah, ani maximální hodnota mají hodnoty významně nižší a fosfor by tedy neměl mít významný negativní vliv na vlastnosti hodnocené litiny.

Také byl hodnocen uhlíkový ekvivalent. Průměrná hodnota byla 4,22 % ze 104 vzorků (**obr. 25**). Jedná se tedy pouze o mírně podeutektické litiny. Rozložení uhlíkového ekvivalentu dle Anderson-Darlingova testu má normální rozdělení. To znamená, že na proces působí pouze náhodné vlivy a proces je řízen vyhovujícím způsobem.

Dle literatury [1] je takový uhlíkový ekvivalent vyhovující, ale nachází se na horní doporučené hodnotě. Bylo by vhodné hodnotu uhlíkového ekvivalentu, resp. koncentrace uhlíku a křemíku mírně snížit.

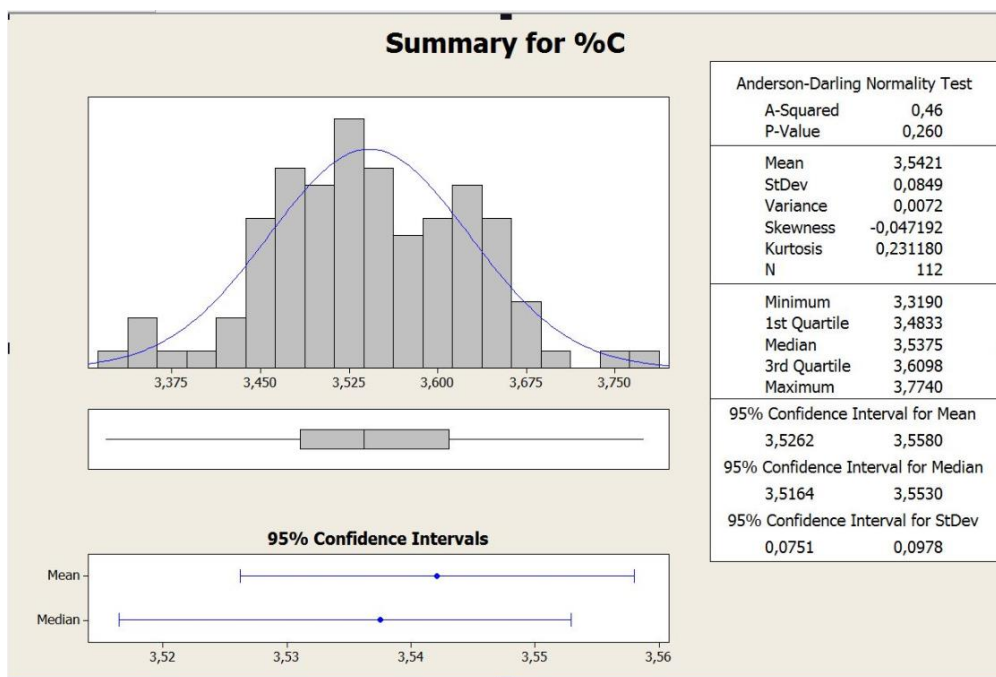


Obr. 25 Vyhodnocení statistických charakteristik pro uhlíkový ekvivalent

6.2. Litina s kuličkovým grafitem

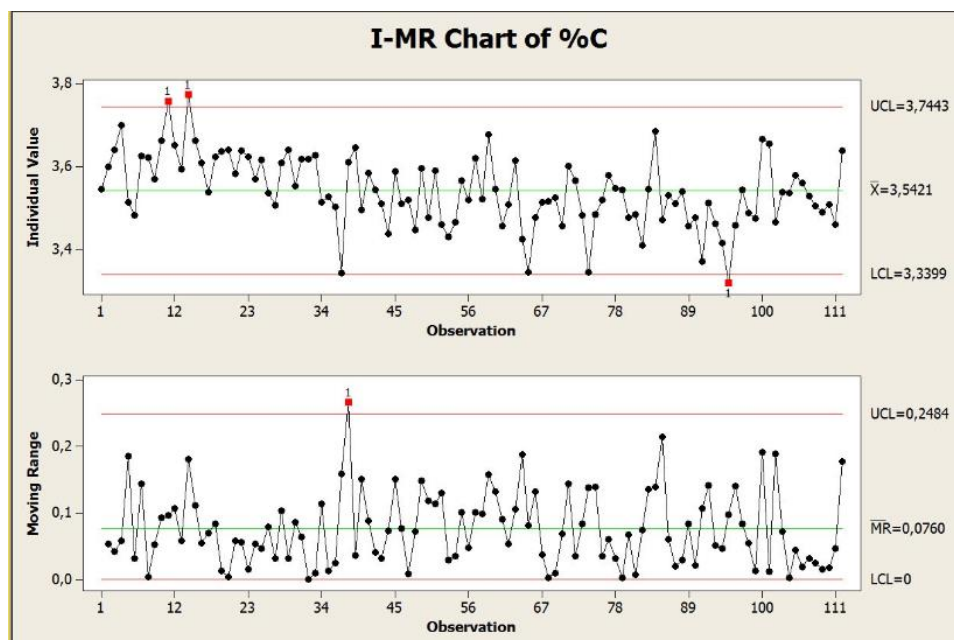
Stejně jako u litiny s lupínkovým grafitem, i chemické složení litiny s kuličkovým grafitem se hodnotilo pomocí statistického programu Minitab. Chemické složení pro grafitické litiny není předepsané a literatura [1] neuvádí optimální chemické složení pro litinu ČSN-GJS-400. Vhodné chemické složení bylo převzato z práce [7]. V praxi se posuzuje chemické složení podle uhlíkového ekvivalentu (CE), který by se měl pohybovat od 4,2 do 4,4 %. Vyhodnoceno bylo 113 vzorků.

Prvním hodnoceným prvkem byl uhlík. Pomocí programu Minitab byly vyloučeny odlehlé chyby a dále byly vyhodnoceny statistické charakteristiky (**obr. 26**). Celkový počet vzorků po vyloučení odlehlých hodnot byl 112. Intervalový odhad střední hodnoty koncentrace uhlíku se s 95 % spolehlivostí pohyboval v rozmezí 3,53 % do 3,56 %. Rozložení koncentrace uhlíku dle Anderson-Darlingova testu má normální rozdělení (p hodnota = 0,26). Minimální hodnota koncentrace uhlíku z celého souboru činila 3,32 % a maximální 3,77 %. Hodnota mediánu činila 3,50 % (viz **obr. 26**).



Obr. 26 Vyhodnocení statistických charakteristik pro uhlík

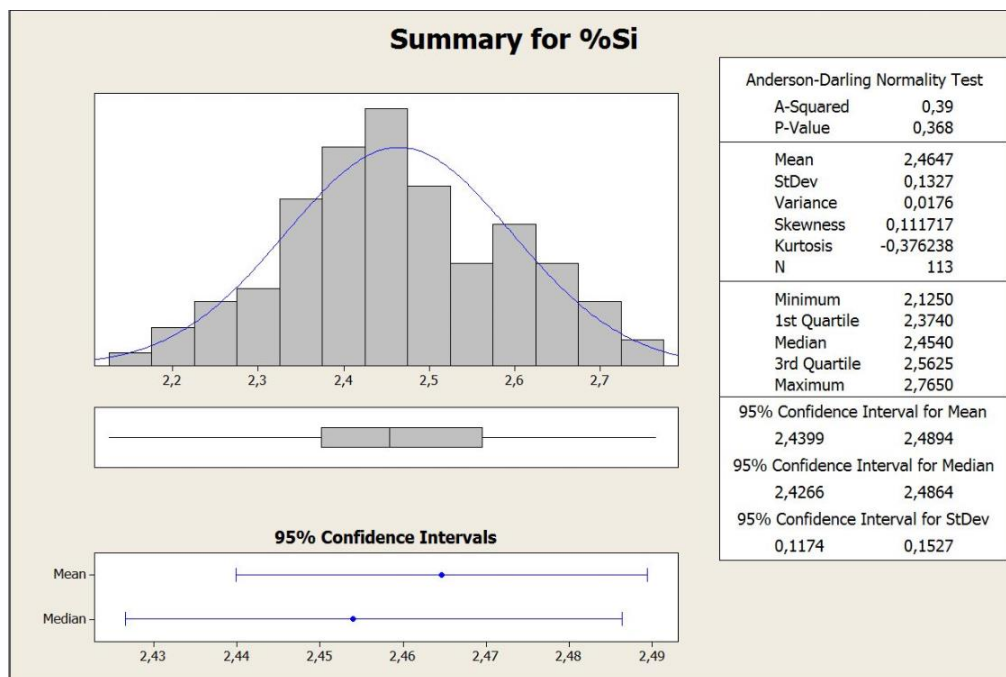
Poté byl pomocí programu Minitab vytvořen časový průběh obsahů uhlíku v jednotlivých tavbách. Až na 3 případy, kdy se obsahy nacházely mimo regulační meze, se obsahy pohybovaly okolo aritmetického průměru viz **obr. 27**. Lze doporučit, aby spodní koncentrace uhlíku byly minimálně 3,45 %.



Obr. 27 Vyhodnocení trendu obsahu uhlíku

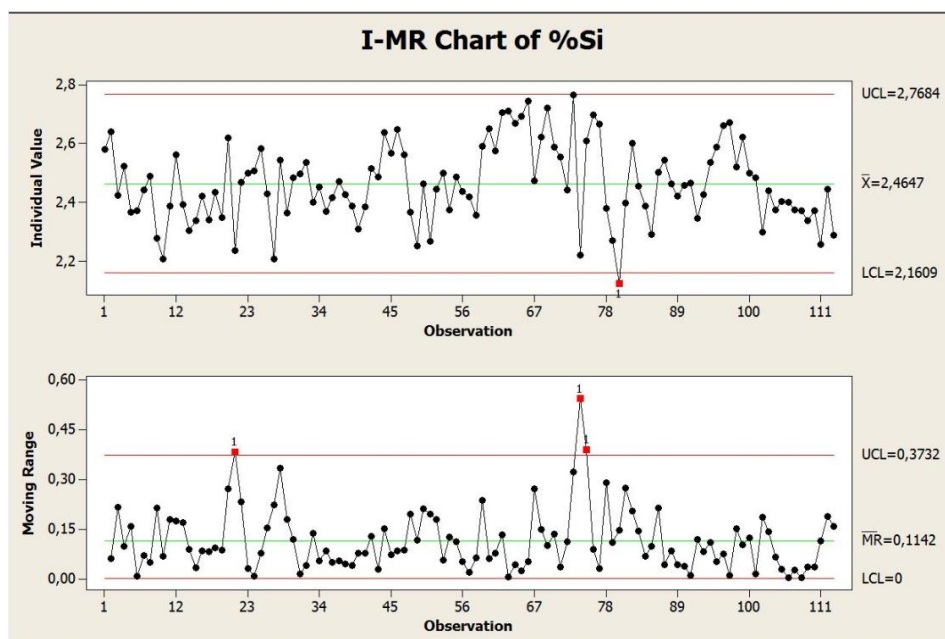
Potom se opět pomocí programu Minitab hodnotila koncentrace křemíku. Opět byly nejprve vyloučeny odlehlé chyby a dále byly vyhodnoceny statistické charakteristiky (**obr. 28**). Intervalový odhad střední hodnoty koncentrace křemíku se s 95 % spolehlivostí pohyboval v rozmezí 2,44 % až 2,49 %. Rozložení koncentrace křemíku dle Anderson-Darlingova testu má

normální rozdělení (p hodnota = 0,37). Minimální hodnota koncentrace křemíku z celého souboru činila 2,13 % a maximální 2,77 %. Hodnota mediánu činila 2,46 %.



Obr. 28 Vyhodnocení statistických charakteristik pro křemík

Stejně jako u uhlíku byl dále sledován trend obsahů křemíku, který byl seřazen chronologicky. Ze začátku roku byl trend vyhovující. Postupem času však začal obsah křemíku kolísat od horní ke spodní regulační mezi. Ke konci se obsah křemíku začal opět pohybovat okolo aritmetického průměru (**obr. 29**). Velké výkyvy v koncentraci křemíku mohou souviset s druhováním vratného materiálu a lze doporučit prověřit skladbu vsázky a dodržování technologických předpisů.



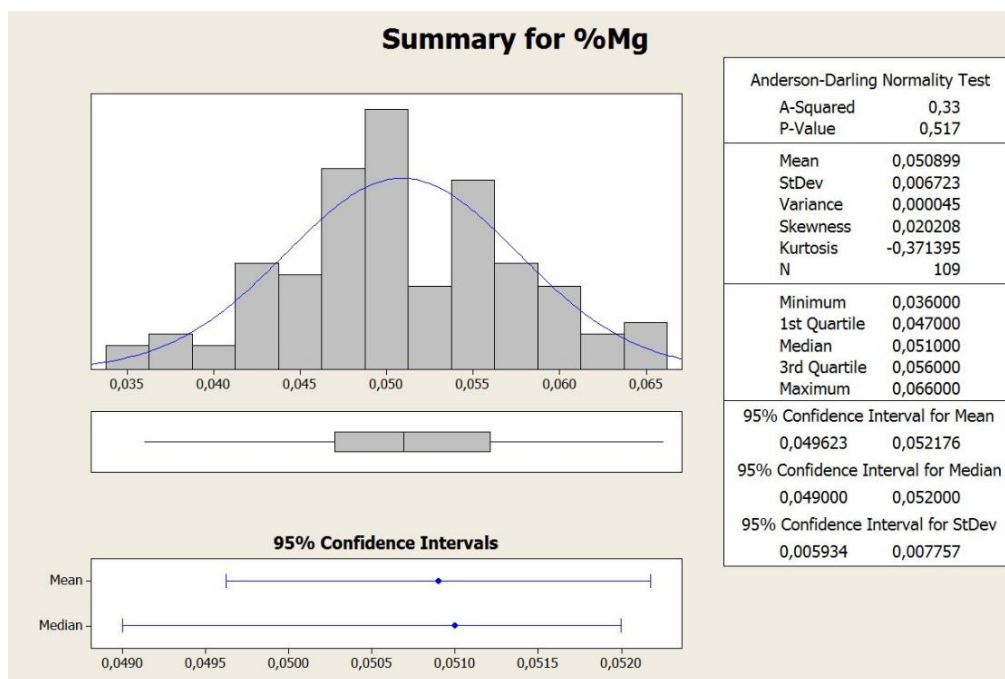
Obr. 29 Vyhodnocení trendu obsahů křemíku

Obsah uhlíku i křemíku je v některých případech mírně vyšší, než je doporučená hranice. To sice může vést k růstu podílu feritu, ale může to mít negativní vliv na hodnoty nárazové práce za snížených teplot. U taveb, kde je hodnocena, lze doporučit udržovat koncentraci křemíku maximálně do 2,00 %.

Koncentrace manganu v litině jakosti GJS 400-18 (15) je považována za nežádoucí, neboť vyšší koncentrace manganu mohou zvyšovat podíl perlitu. Minimum koncentrace manganu bylo 0,15 % a maximum 0,22 %, tzn., rozpětí koncentrací manganu činilo pouze 0,07 %. Takto nízké hodnoty nebudou mít pravděpodobně významný vliv na strukturu a vlastnosti litiny a proto zde není uváděno ani statistické a grafické hodnocení manganu ve sledovaných tavných.

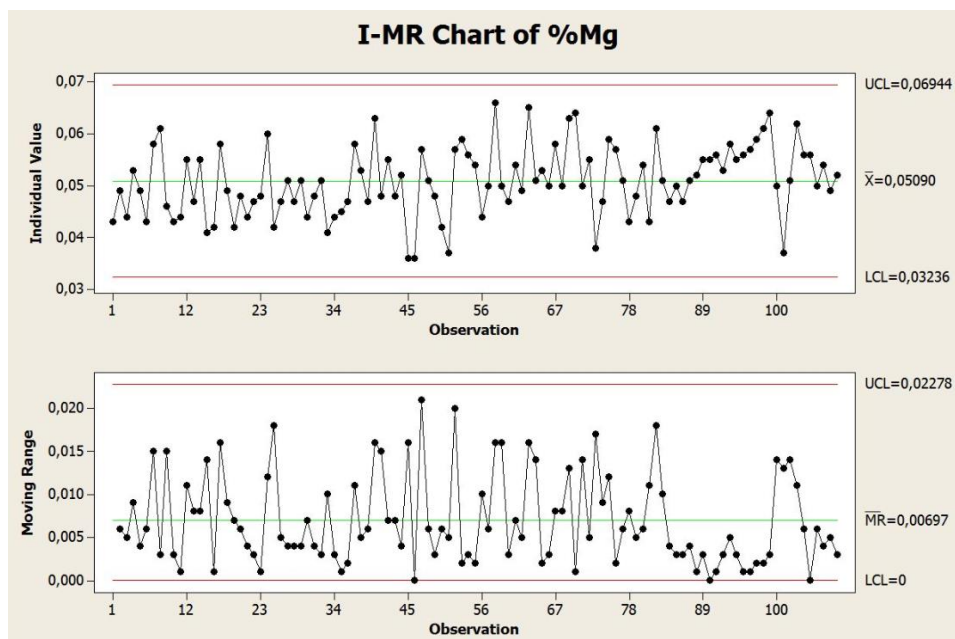
Po modifikaci se intervalový odhad středních hodnot koncentrace síry pohybují v rozmezí 0,011 až 0,012 %. Rozpětí souboru koncentrace síry bylo pouze 0,007 %. Podobně jako u manganu uvažované rozmezí koncentrací síry nebude mít zásadní vliv na vlastnosti litiny. Je nutné akceptovat, že se koncentrace síry stanovuje ve vzorcích pouze spektrálně a může být způsobena významná chyba v měření. Proto zde není uváděno ani statistické a grafické hodnocení koncentrace síry ve sledovaných tavných.

Dále se ve sledovaných tavných hodnotila koncentrace hořčíku. Na základě testů byly vyloučeny 4 odlehlé hodnoty. Ze zbylých 109 vzorků se poté vyhodnotily statistické charakteristiky. Intervalový odhad střední hodnoty koncentrace hořčíku se s 95 % spolehlivostí pohyboval v rozmezí 0,049 % až 0,052 %. Minimální hodnota koncentrace hořčíku z celého souboru činila 0,036 % a maximální 0,066 %. Hodnota mediánu činila 0,051 % (viz **obr. 30**).



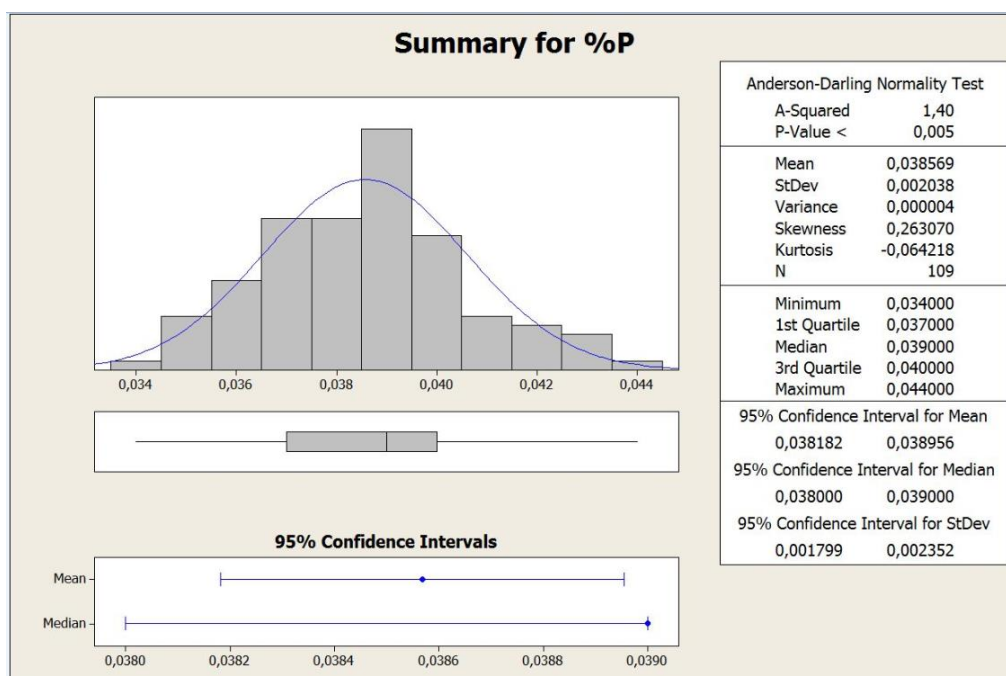
Obr. 30 Vyhodnocení statistických charakteristik pro hořčík

Koncentrace hořčíku se téměř celou dobu u sledovaných taveb oscilovala okolo průměrné hodnoty. Hodnoty ani jednou nepřekročily horní ani dolní regulační mez (**obr. 31**). Průběh koncentrace hořčíku byl hodnocen jako zcela vyhovující a ukazuje na zvládnutý proces modifikace v podmínkách *Alfe Brno*.



Obr. 31 Vyhodnocení trendu obsahu hořčíku

Posledním hodnoceným prvkem byl fosfor. Po vyloučení odlehlých chyb se opět jako u předešlých prvků hodnotily statistické charakteristiky pomocí programu Minitab. Intervalový odhad střední hodnoty koncentrace fosforu se s 95 % spolehlivostí pohyboval v rozmezí 0,038 % až 0,039 %. Rozložení koncentrace křemíku dle Anderson-Darlingova testu nemá normální rozdělení (p hodnota = 0,005). Minimální hodnota koncentrace fosforu z celého souboru činila 0,034 % a maximální 0,039 %. Hodnota mediánu činila 0,039 % (**obr. 32**).

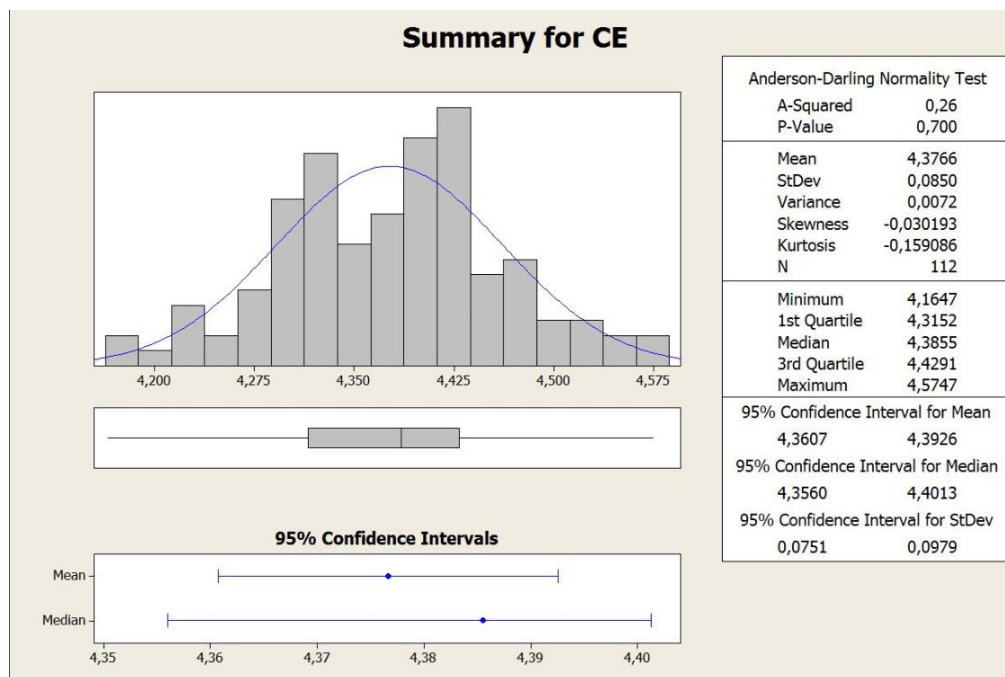


Obr. 32 Vyhodnocení statistických charakteristik fosforu

Koncentrace fosforu i rozpětí koncentrací fosforu je minimální a v uvažovaném intervalu hodnot nemá významný negativní vliv na vlastnosti litiny. Nízké hodnoty koncentrace fosforu

ukazují na vhodnou skladbu vsázky a konstantní jakost ocelového odpadu a surového železa z pohledu koncentrace fosforu.

Také jako u litiny s lupínkovým grafitem byl hodnocen i litiny s kuličkovým grafitem uhlíkový ekvivalent. Průměrná hodnota byla 4,38 % ze 112 vzorků (**obr. 33**). Rozložení hodnot uhlíkového ekvivalentu dle Anderson-Darlingova testu má normální rozdělení (p hodnota = 0,70). Jedná se tedy o mírně nadeutektické litiny. Dle literatury [1] je takový uhlíkový ekvivalent vyhovující.



Obr. 33 Vyhodnocení statistických charakteristik uhlíkového ekvivalentu

7. VYHODNOCENÍ TAHOVÝCH ZKOUŠEK

Pro tahové zkoušky byly zaformovány a odlity 4 odděleně lité tyče z litiny s lupínkovým grafitem jakosti ČSN-GJL-200. Odlití bylo provedeno ve slévárně *Alfe Brno s.r.o.* Z těchto tyčí byly následně vyrobeny 4 zkušební tyče. Dále se zaformovaly a odlily 4 Y-bloky z litiny s kuličkovým grafitem (ČSN-GJS-400), z nichž se vyrobilo a následně přetřhlo 6 zkušebních těles. Tahové zkoušky se prováděly na trhačím stroji Zwick/Roell Z250.

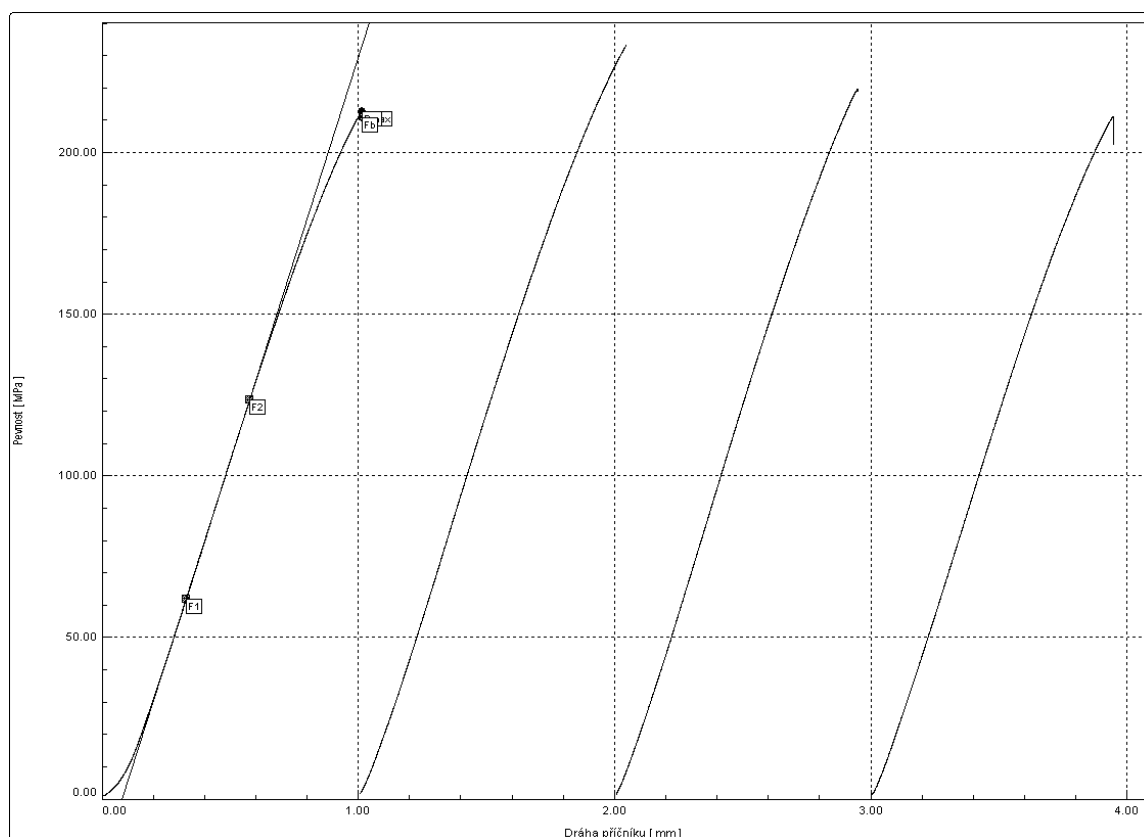
7.1. Vyhodnocení tahových zkoušek litiny s lupínkovým grafitem

Pro tahové zkoušky se zhotovily normalizované tyče o průměru 14 mm se závitovými hlavami M20. Naměřené hodnoty meze kluzu a maximálního zatížení F_{\max} jsou uvedeny v **tab. 6**. Zkoušeny byly vzorky 27S2, 20S3, 18S4 a 19S5. První dvojčíslí značí datum dne odlití. “S” značí šedou litinu a poslední číslo znamená pořadí tavby.

Tab. 6 Naměřené mechanické vlastnosti u litiny s lupínkovým grafitem

Číslo zkoušky	Číslo vzorku	F_{\max}	R_m
		[N]	[MPa]
1	27S2	32 582	213
2	20S3	35 761	233
3	18S4	33 652	220
4	19S5	32 310	211

Všechny čtyři vzorky mají spíše nižší mez pevnosti, ale stále se nachází v rozmezí stanoveném normou ČSN EN 1563. I přes nižší hodnoty jsou výsledky vyhovující. Průběh zkoušek je znázorněn na **obr. 34**.



Obr. 34 Průběh tahových zkoušek pro litinu s lupínkovým grafitem

Pro zvýšení meze pevnosti bylo doporučeno snížit obsah křemíku příp. uhlíku. Nižší uhlíkový ekvivalent by měl zajistit dosažení vyšších pevností a tvrdostí. S vyšším obsahem křemíku v litině roste podíl feritu, a tím klesá mez pevnosti a tvrdost. I přes vyšší obsah křemíku jsou vzorky z litiny s lupínkovým grafitem vyhovující.

7.2. Vyhodnocení tahových zkoušek litiny s kuličkovým grafitem

Tahové zkoušky litiny s kuličkovým grafitem byly vyhodnoceny ze 6 normalizovaných tyčí se závitovými hlavami. Čísla vzorků byla 20TA1, 20TA2, 18TA, 19TA, 27TA1 a 27TA2.

První dvě čísla na čísle vzorků znamenají den odlití zkušebních bloků. “T” značí tvárnou litinu a čísla na konci znamenají, že jsou vyrobeny ze stejného bloku. Opět byl použit trhací stroj Zwick/Roell Z250. Výsledné zjištěné hodnoty byly porovnány s hodnotami z **tab. 2** a uvedeny v **tab. 7**. Grafické vyhodnocení tahových zkoušek je znázorněno na **obr. 34**.

Hodnoty meze pevnosti se pohybovaly od 462 MPa až po hodnotu 612 MPa. V porovnání s **tab. 7** jsou stanovené hodnoty vyšší až o 112 MPa. Vysoké meze pevnosti u některých vzorků souvisí, jak později ukázalo metalografické hodnocení, s vyšším podílem ve struktuře.

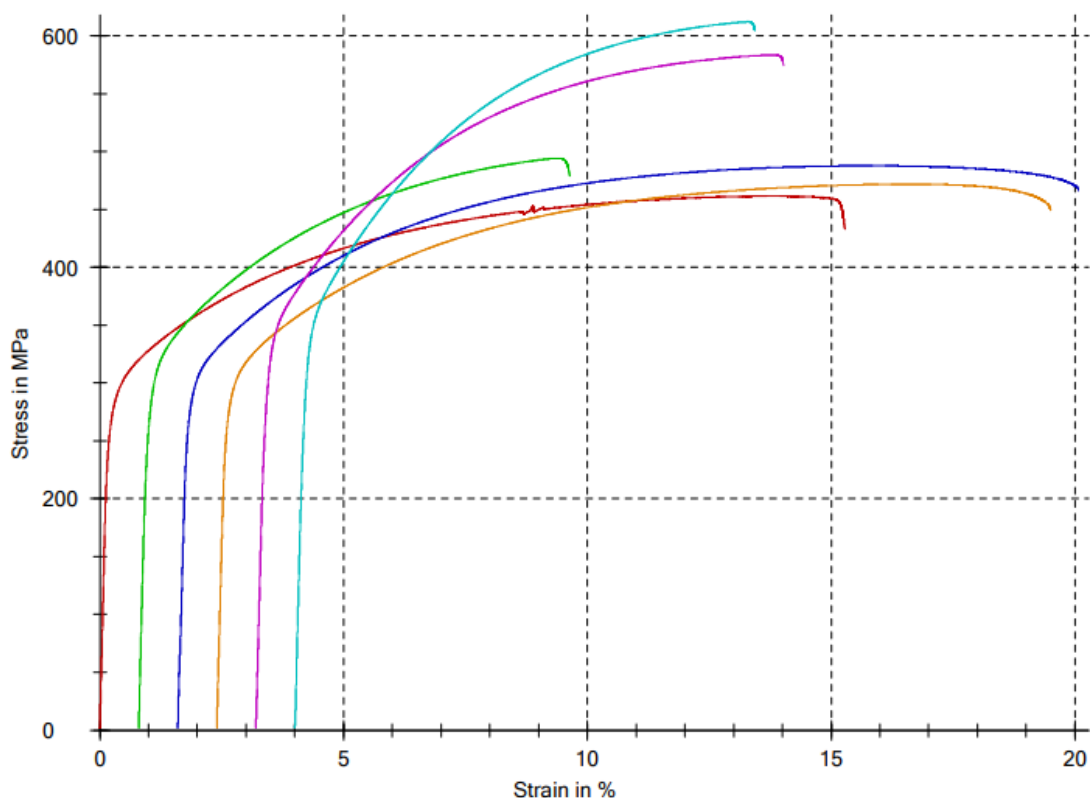
Hodnoty meze kluzu se nacházely v intervalu od 292 MPa do 355 MPa. Od požadované hodnoty 250 MPa se naměřené hodnoty uvedené v **tab. 2** lišily až o 155 MPa. Vysoké meze kluzu u některých taveb souvisí s vysokým podílem perlitu, tedy vyšší pevností i mezí kluzu a naopak nižší tažností. Mez pevnosti a smluvní mez kluzu u tavby stanovené ze vzorků 27TA1 a 27TA2 odpovídají jakosti ČSN GJS 500-7 resp., ČSN GJS 600-3.

Tažnost na vzorcích 20TA1, 18TA a 19TA je vyhovující dle normy ČSN EN 1653. Ostatní vzorky měly tažnost pod 15 %, a to až o 6 %. Snížení tažnosti bylo způsobeno vysokými hodnotami meze kluzu a meze pevnosti. S rostoucími mezemi pevnosti a kluzu totiž silně klesá tažnost.

Kvůli vysokým hodnotám mezí kluzu a pevnosti a nevyhovujícím nízkým hodnotám tažnosti bylo doporučeno snížit obsah mědi v litině. Jedná se o litinu s převážně feritickou strukturou, kde legování mědí není ani žádoucí. Je nutné snížit kontaminaci taveniny mědí pečlivou separací jednotlivých jakostí litiny s kuličkovým grafitem při druhování vsázky.

Tab. 7 Výsledné hodnoty mechanických vlastností zjištěné tahovou zkouškou dle ČSN EN 1653

Barva vzorku	Číslo vzorku	Nejvyšší zatěžovací síla F_{\max}	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	Mez pevnosti R_m	Tažnost A
		[N]	[MPa]	[MPa]	[%]
	Norma		250	400	15
	20TA1	36 757	292	462	15,0
	20TA2	39 428	312	494	8,6
	18TA	38 916	305	488	18,1
	19TA	37 570	301	472	16,8
	27TA1	46 643	345	583	10,5
	27TA2	48 743	355	612	9,1



Obr. 35 Grafický závislost pretvoření na zatěžování během tahové zkoušky

8. VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK TVRDOSTI

Tvrdość byla měřena metodou podle Brinella dle ČSN ISO 6506 kuličkou o průměru 10 mm, zatížením 3000 kg po dobu 10 s. Měření byla provedena na hydraulickém stroji Brinell BK 300 b. Měření bylo provedeno na separátne litých vzorcích LLG a LKG rozměru 100 x 100 mm s proměnlivou tloušťkou stěny v rozmezí 5 až 40 mm. Na každém vzorku se provedla tři měření. Výsledná tvrdość je dána jejich aritmetickým průměrem. V **tab. 8** jsou uvedeny hodnoty pro jednotlivé vzorky z litiny s lupínkovým grafitem. Dále pak jsou v **tab. 9** uvedeny hodnoty pro vzorky z litiny s kuličkovým grafitem.

Tab. 8 Výsledky měření tvrdości pro LLG

Číslo vzorku	Tloušťka stěny [mm]	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Průměr	Směrodatná odchylka
27S2	5	197	199	197	198	0,94
06S3	5	205	190	187	184	7,87
27S2	10	229	226	229	228	1,41
06S3	10	207	213	198	206	6,16
27S2	20	222	217	219	219	2,05
06S3	20	197	207	207	204	4,71
27S2	40	207	197	193	199	5,89
06S3	40	215	213	207	212	3,34

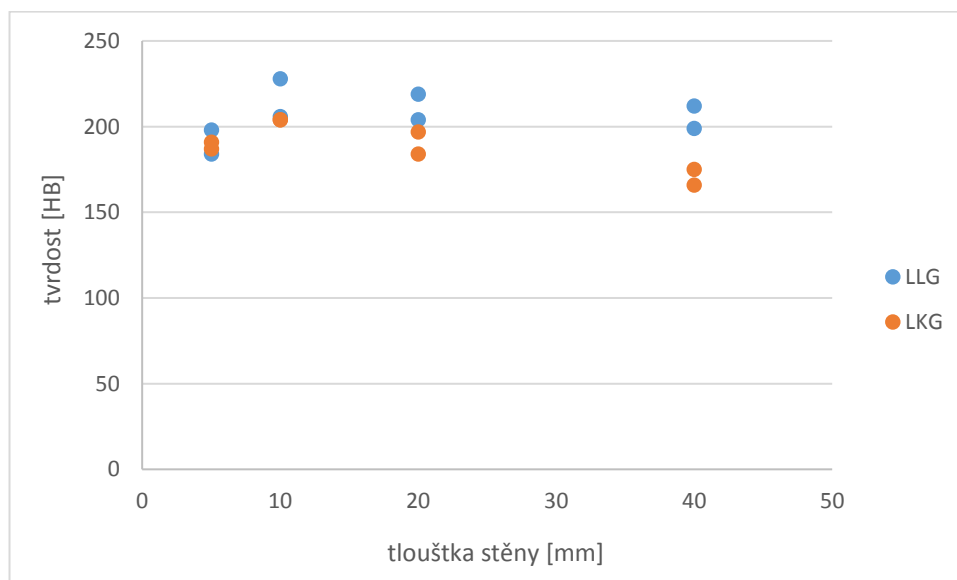
U vzorků litiny s lupínkovým grafitem se tvrdosti v závislosti na tloušťce odlitku pohybovaly v rozmezí 184 až 228 HB. Dle **tab. 2** by se měla maximální tvrdost dané jakosti litiny pohybovat na hodnotě max. 220 HB. Graficky jsou výsledky uvedeny v **obr. 36**. Z něj vyplývá, že tvrdost se u sledovaných vzorků s tloušťkou 5 až 40 mm významně nemění.

Tab. 9 Výsledky měření tvrdosti pro LKG

Číslo vzorku	Tloušťka stěny [mm]	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Průměr	Směrodatná odchylka
27TA	5	197	180	184	187	7,26
06TA	5	207	166	200	191	17,91
27TA	10	217	199	195	204	9,57
06TA	10	207	200	205	204	2,94
27TA	20	187	180	185	184	2,94
06TA	20	197	200	193	197	2,87
27TA	40	175	179	170	175	3,68
06TA	40	163	166	170	166	2,86

Naměřené tvrdosti u litiny s kuličkovým grafitem se pohybovaly v rozmezí 166 HB až 204 HB. Tyto hodnoty se nachází v rozmezí podle práce [1]. Vyšší tvrdosti byly naměřeny u vzorků s podílem perlitu. Graficky jsou výsledky uvedeny v **obr. 36**.

Tvrdosti litiny s lupínkovým grafitem GJL 200 a litiny s kuličkovým grafitem jakosti GJS 400-18 (15) jsou v odlitcích s tloušťkou stěny 5 až 20 mm zcela srovnatelné. S rostoucí tloušťkou stěny roste podíl feritu v LKG a tvrdost tedy podle očekávání klesá.



Obr. 36 Hodnoty tvrdosti v litině s lupínkovým a kuličkovým grafitem v závislosti na tloušťce stěny odlitku

9. METALOGRAFICKÉ HODNOCENÍ VZORKŮ

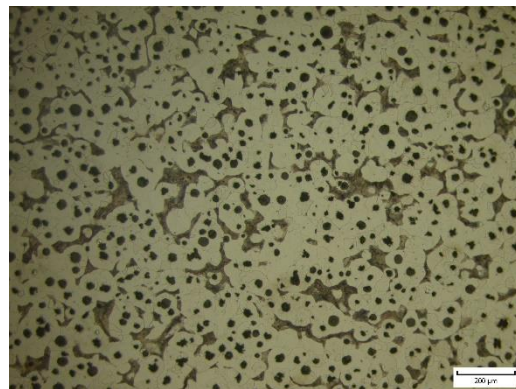
Kvalitativní a kvantitativní parametry struktury litin se zjišťovaly porovnáním struktury vzorků se strukturními etalony dle ČSN 420461. Všechny parametry se určovaly při stonásobném zvětšení na světelném mikroskopu. Dále je popsáno hodnocení struktury pro litinu s lupínkovým i kuličkovým grafitem. Pro každý vzorek je zachycen naleptaný i neleptaný stav.

9.1. Vyhodnocení vzorků z litiny s kuličkovým grafitem

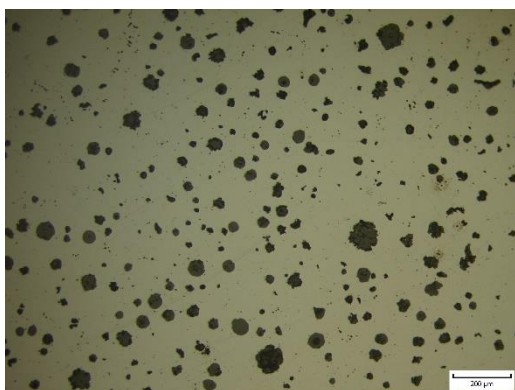
Vzorky z litiny s kuličkovým grafitem byly odebrány, zalisovány, broušeny a leštěny standartními postupy. Dále proběhlo naleptání vzorků pro zviditelnění struktury materiálu. Snímky neleptané i leptané struktury jsou pořízeny se zvětšením 100x. Vzorky v neleptaném stavu jsou uvedeny na **obr. 37** a **obr. 39**. Na **obr. 38** je struktura vzorku 19TA převážně feritická. **Obr. 40** zachycuje strukturu vzorku 27TA1, kde je ve struktuře 70-75% podíl perlitu. Ostatní sledované struktury LKG jsou v příloze 1.



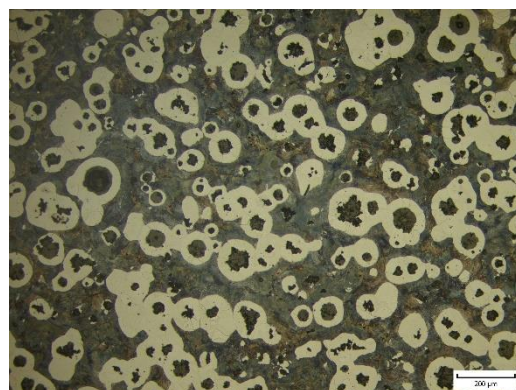
Obr. 37 Vzorek 19TA nelept. 100x



Obr. 38 Vzorek 19TA lept. 100x



Obr. 39 Vzorek 27TA1 nelept. 100x



Obr. 40 Vzorek 27TA1 lept. 100x

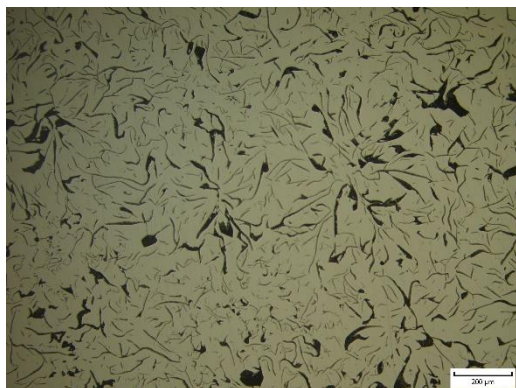
Výsledky metalografického hodnocení vzorků litiny s kuličkovým grafitem jsou shrnuty v **tab. 10**. Kromě posledních hodnocených vzorků 27TA1 a 27TA2 výrazně převažoval ve struktuře obsah feritu. Vzorky 27TA1 a 27TA2 obsahovaly feriticko-perlitickou strukturu s větší velikostí grafitu. Velikost grafitu se pohybovala od 30 do 120 μm . U všech vzorků převažoval pravidelný tvar grafitu (typ VI). Podíl perlitu v některých vzorcích dosahoval až 75 %. To vysvětluje příčiny vysokých pevností u některých vzorků a naopak nižších tažností než odpovídá normě pro danou litinu. Obsah perlitu se zjišťoval planimetricky, pomocí milimetrového papíru.

Tab. 10 Metalografické hodnocení vzorků z litiny s kuličkovým grafitem

Číslo vzorku	Třída velikosti (velikost grafitu [μm])	Tvar grafitu pravidelný/nepravidelný	Obsah perlitu [%]
18TA	7 (15–30)	95/5	10
19TA	6 (30–60)	90/10	6
20TA1	6 (30–60)	90/10	12
20TA2	6 (30–60)	75/25	23
27TA1	5 (60–120)	85/15	75
27TA2	6 (30–60)	80/20	70

9.2. Vyhodnocení vzorků z litiny s lupínkovým grafitem

Stejně jako u litiny s kuličkovým grafitem byly odebrány, zalisovány, broušeny, leštěny a následně leptány 4 vzorky. Snímky leptané i neleptané struktury byly zachyceny se zvětšením 100x. Vzorky se zkoumaly na světelném mikroskopu. Výsledky jsou shrnuty v **tab. 11**. Na **obr. 41** a **obr. 43** jsou uvedeny snímky struktury litiny s lupínkovým grafitem v neleptaném stavu. Na **obr. 42** a **obr. 44** jsou uvedeny snímky struktury po tepelném zpracování. Na **obr. 42** je struktura s 25 % obsahem feritu a na **obr. 44** struktura převážně perlitická. Další metalografické snímky se nachází v příloze 2.



Obr. 41 Vzorek 18S4 nelept. 100x



Obr. 42 Vzorek 18S4 lept. 100x



Obr. 43 Vzorek 27S2 nelept. 100x



Obr. 44 Vzorek 27S2 lept. 100x

Tab. 11 Metalografické hodnocení vzorků z litiny s lupínkovým grafitem

Číslo vzorku	Třída velikosti (velikost grafitu [μm])	Tvar grafitu pravidelný/nepravidelný	Typ grafitu	Obsah perlitu [%]
18S4	4 (120-250)	100/0	A/B	75
19S5	4 (120-250)	100/0	B	85
20S3	5 (60-120)	100/0	B	80
27S2	4 (120-250)	100/0	B	90

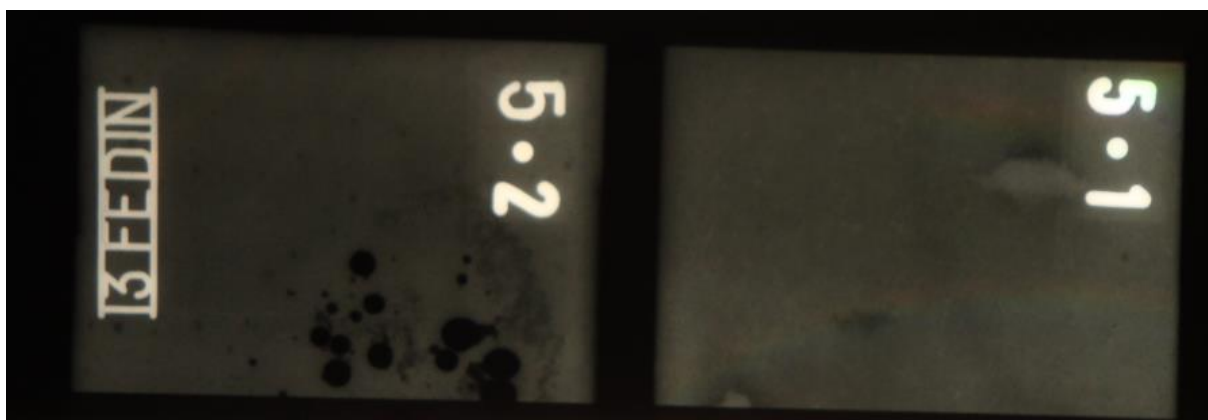
Velikost grafitu se pohybovala od 60 do 250 μm (velikost 4 a 5), hodnoceno etalonem dle ČSN 420461. Ve struktuře se nacházel lupínkový tvar grafitu. Ve všech vzorcích byly přítomny růžice. Rozložení grafitu bylo podle etalonu hodnoceno písmenem B. Obsah perlitu převažoval ve všech zkoumaných vzorcích nad obsahem feritu.

Vzorky litiny s kuličkovým a lupínkovým grafitem, dodány slévárnou *Alfe Brno s.r.o.*, se rozřezaly a připravilo se z nich 6 metalografických vzorků z litiny s kuličkovým a 4 metalografické vzorky z litiny s lupínkovým grafitem. Hodnocení proběhlo na světelném mikroskopu. Pozorován byl základní materiál v leptaném i neleptaném stavu. Materiál vzorků z litiny s kuličkovým grafitem byl převážně tvořen dokonale zrnitým grafitem, ale vyskytoval se i nedokonale zrnitý grafit (ve vzorku 20TA2 až 50 %). Ve vzorcích z litiny s lupínkovým grafitem byl vyloučen grafit ve formě pravidelných lupínků. Vzorky obsahovaly růžice. Podíl perlitu byl od 75 % do 90 %.

10. VYHODNOCENÍ VNITŘNÍCH VAD POMOCÍ PROZAŘOVACÍ METODY

Pro prozařovací RTG metody byly použity odlitky desek z litiny s lupínkovým i kuličkovým grafitem o tloušťce 5, 10, 20 a 40 mm. Jednalo se o vzorky, které byly použity již pro měření tvrdosti. Tloušťka stěny 5-40 mm reprezentuje i tloušťky, které mají nejčastěji vyráběné odlitky ve slévárně *Alfe Brno*. Vzorky s tloušťkou stěny 40 mm nebylo možné na použitém zařízení prozářit a byly proto z hodnocení vyloučeny.

Pro hodnocení jakosti odlitků se sledovaly především bubliny a řediny, jako nejčastější vady v provozu slévárny *Alfe Brno*. V **tab. 12** jsou vypsány podmínky měření, U značí urychlovací napětí, I proud a FFD je ohnisková vzdálenost příruby. V **tab. 13** jsou shrnuty jakosti sledovaných vzorků, ty dále byly vyhodnoceny jako přípustné či nepřípustné. Na **obr. 45** a **obr. 46** jsou pozorovatelné bubliny, síťové bubliny a vměstky. Ostatní rentgenové snímky dalších vzorků se nachází v příloze 3.



Obr. 45 Rentgenový snímek vzorků 5.1 a 5.2



Obr. 46 Rentgenový snímek vzorků 20.3 a 20.4

Tab. 12 Podmínky pro měření prozařovací metodou

číslo vzorku	tloušťka [mm]	t [min]	U [keV]	I [mA]	FFD [mm]
5.1-4	5	1,2	120	4	1000
10.1-4	10	1,2	150	4	1000
20.1-4	20	3,6	165	4	1000

Při prozařovací zkoušce vady, které jsou na snímku tmavší než okolí, jsou vady s menší hustotou než původní matrice. Jsou to tedy převážně dutiny. Ty byly patrné u vzorků 5.2, 10.1 a 20.1 (**obr. 45**). Bubliny mohou být způsobeny kyslíkem (reakce s C za vzniku CO), vodíkem či dusíkem. Tento typ bublin vzniká při tuhnutí odlitku v důsledku změny rozpustnosti v tuhém a kapalném stavu, kdy dochází ke skokové změně rozpustnosti plynů. Nejčastější příčinou vzniku bublin při odlévání litinových odlitků do bentonitových formovacích směsí (lití na syrovo) je zahlcený plyn. Jedná se o plyn uzavřený ve formě při odlévání (vzduch) nebo vodní páru, která se uvolňuje během odlévání i chladnutí a tuhnutí odlitku z formovací směsi.

U vzorků 5.1 a 5.3 byly identifikovány místa – vměstky s vyšší hustotou, než má původní struktura – proto se jeví na snímcích jako světlá místa. Na snímku 20.4 (**obr. 46**) jsou zřejmě rozptýlené staženiny – řediny nebo síťkové bubliny, které vznikají důsledkem vypařování vody v nedostatečně vysušených formách a jádrech. [23]

Tab. 13 Vyhodnocení prozařovací zkoušky

Číslo vzorku	Materiál	Tloušťka stěny [mm]	Hodnocení jakosti
5.1	LLG	5	přípustné
5.2	LKG	5	nepřípustné
5.3	LLG	5	přípustné
5.4	LKG	5	nepřípustné
10.1	LKG	10	nepřípustné
10.2	LKG	10	nepřípustné
10.3	LLG	10	přípustné
10.4	LLG	10	přípustné
20.1	LKG	20	nepřípustné
20.2	LLG	20	přípustné
20.3	LLG	20	přípustné
20.4	LKG	20	nepřípustné

RTG kontrola je velmi objektivní a přísnou zkouškou, která se u litinových odlitků používá velmi zřídka. Slévárna *Alfe Brno* se zabývá výrobou litinových odlitků, u nichž tato zkouška nebyla dosud požadována. Přesto lze výsledky tohoto hodnocení využít pro zlepšení vlastního procesu. Doporučuji zkoušené odlitky rozřezat a vady analyzovat. Na základě přesné klasifikace vady bude možné stanovit příčinu i vhodná nápravná opatření.

11. ZÁVĚR

Bakalářská práce byla řešena ve spolupráci se slévárnou *Alfe Brno s.r.o.* Literární řešerše pojednává o grafitických litinách se zaměřením na litiny s kuličkovým a lupínkovým grafitem. Přesněji o zkoušení jejich mechanických vlastností a hodnocení vnitřních vad. Experimentální část se zabývá především vyhodnocením chemického složení u litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem pomocí statistického programu Minitab 15. Dále byly provedeny tahové zkoušky a zkoušky tvrdosti. Na světelném mikroskopu se hodnotily struktury litin v leptaném i neleptaném stavu. Nakonec se provedla kontrola vnitřních vad pomocí prozařovací metody.

Provedenými experimenty bylo zjištěno:

- Chemické složení hodnocených litin se zpravidla pohybovalo v optimálním rozmezí koncentrací všech významných prvků, které jsou doporučovány v řadě publikací. U litiny s lupínkovým grafitem byly obsahy uhlíku křemíku a manganu voleny k horní doporučené hranici. To sice příznivě ovlivňuje slévárenské vlastnosti (zabíhavost, stahování při tuhnutí), ale negativně to ovlivňuje mechanické vlastnosti. U litiny s kuličkovým grafitem byly v některých případech zjištěny tavby s nižší koncentrací uhlíku než 3,4 %. Lze doporučit zvýšit obsah uhlíku na spodní hranici 3,45 % pro LKG a naopak snížit uhlíkový ekvivalent u LLG.
- Zkouška tahem u vzorků z litiny s lupínkovým grafitem prokázaly vyhovující pevnosti, ale lze doporučit zvýšit mez pevnosti a zajistit větší rezervu oproti požadavkům normy. Při hodnocení vzorků z litiny s kuličkovým grafitem byly v některých případech stanoveny výrazně vyšší hodnoty meze kluzu a meze pevnosti než požaduje norma. Tažnost v těchto případech byla nižší než předepsaná. Nízké hodnoty tažnosti souvisely s výskytem vyššího podílu perlitu ve struktuře. Doporučení je pečlivěji sledovat koncentrace mědi v litině a zejména separovat jednotlivé jakosti LKG a zabránit vsázení litin s vyšší pevností do feritických litin s kuličkovým grafitem.
- Zkouškou tvrdosti dle Brinella bylo zjištěno, že obě zkoumané litiny se pohybují v rozmezí doporučených hodnot pro tvrdost. Nižší hodnoty tvrdosti, tj. tvrdosti na spodní hranici jsou dány vyšším uhlíkovým ekvivalentem zejména u LLG. Nižší tvrdosti jsou z hlediska obrobitelnosti výhodné a není třeba tvrdosti, nebude-li to zákazník požadováno, nijak měnit.
- Metalografické hodnocení vzorků litiny s lupínkovým grafitem prokázalo vyhovující strukturu litiny. Místně byl zaznamenán výskyt růžic grafitu a lze doporučit zabývat se problematikou očkování litin. Je možné doporučit i zvýšení obsahu síry. Metalografické hodnocení vzorků litin s kuličkovým grafitem prokázalo, že ve struktuře se obvykle nachází podíl 5 – 15 % nedokonale zrnitého grafitu. To je v běžných odlitcích z LKG zcela obvyklé. Metalografické hodnocení dále prokázalo, že se ve vzorcích litiny nachází i vyšší podíl perlitu než odpovídá dané jakosti. To vede, jak bylo výše uvedeno, k vyšší pevnosti litiny, ale i nižší tažností. Lze doporučit, jak bylo výše uvedeno, pečlivěji hlídat koncentrace perlitotvorných prvků v tavenině, zejména mědi a manganu.
- Prozařováním materiálu byly nalezeny u většiny vzorků bubliny či vměstky. Tyto vzorky se vyhodnotily jako nepřipustné z hlediska jakosti materiálu. Vady jako bubliny byly pravděpodobně způsobeny nedokonale vysušenou formovací směsí. Bylo by vhodné zavést v provozu slévárny pravidelnou kontrolu formovací směsi.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Brno: PC-DIR, 1. vydání, 1998, 166 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-1263-1.
- [2] ALFE BRNO. *Historie firmy* [online]. 2018 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <<http://www.alfe.cz/historie-firmy/>>
- [3] ALFE BRNO. *Výroba dekorativní, městské a zahradní litiny* [online]. 2018 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <<http://www.alfe.cz/dekorativni-litina/>>
- [4] ALFE BRNO. *Výroba průmyslových odlitků* [online]. 2018 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <<http://www.alfe.cz/prumyslove-odlitky/>>
- [5] ALFE BRNO. *Výroba přesných odlitků ze zinku* [online]. 2018 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <<http://www.alfe.cz/odlitky-ze-zinku/>>
- [6] ALFE BRNO. *Výroba cínových a olověných odlitků* [online]. 2018 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <<http://www.alfe.cz/cinove-odlitky/>>
- [7] PLUHAŘ, Jaroslav, KORITTA, Josef. *Strojírenské materiály*. 1. vydání, Praha: SNTL, 1966, 560 s. Redakce strojírenské literatury. ISBN 04-254-66.
- [8] SKOČOVSKÝ, Petr; PODRÁBSKÝ, Tomáš. *Grafitické liatiny*. 1.vydanie. Žilina: Edis, 2005. 168 s. ISBN 80-8070-390-6.
- [9] PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-7204-283-1.
- [10] VELES, P. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1985, 401 s.
- [11] HLUCHÝ, Miroslav; KOLOUCH, Jan. *Strojírenská technologie I: Nauka o materiálu*. Praha: Scientia, 2002. 266 s.
- [12] Strojírenská technologie. *Vlastnosti materiálů – tvrdost* [online]. 2005-2007 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06b_tvrdost.php
- [13] VÍTÁMVÁS, Zdeněk. *Moderní diagnostické metody používané v defektoskopii* [online]. 2009 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15173
- [14] SKÁLOVÁ, Jana; KOVARÍK, Rudolf; BENEDIKT, Vladimír. *Základní zkoušky kovových materiálů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2005. 178 s.
- [15] PLUHAŘ, Jaroslav, et al. *Nauka o materiálech. 1. vydání*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989. 552 s.
- [16] PODHORA, Jiří. *Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů*. Brno: TDS Brno – SMS, s.r.o., 2005. ISBN 80-903386-4-X.
- [17] KOPEC, Bernard, ŠMÍD, Radislav. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: Nauka o materiálu IV*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [18] ULLMANN, Jiří. *Nedestruktivní zkoušení materiálů: všeobecné znalosti*. 1.vyd. Ostrava: PTS Josef Solnař, 1995. 43 s.
- [19] ALUMECO CZ. *Technické informace* [online] 2018 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.alumeco.cz/technické-informace/obecně/ultrazvukové-testování-hliníku>

- [20] *Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení*. [online] 2018 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z <<http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>>
- [21] PLUHAŘ, Jaroslav, et al. *Strojírenské materiály*. 3. nezměněné vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1981. 568 s.
- [22] OTÁHAL, V. Tvárná litina (Litina s kuličkovým grafitem). [CD-ROM]. Technickoeconomické poradenství, MetalCasting and Foundry Consult, říjen 2006 [cit. 19. 2. 2013]. Dostupný z: <<http://otahalconsult.cz/>>
- [23] ELBEL, T. et al. Vady odlitků ze slitin železa. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992, 339 s

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Seznam obrázků

Obr. 1	<i>Základní rozdělení litin [7]</i>	11
Obr. 2	<i>Litina s lupínkovým grafitem s feriticko-perlitickou matricí [8]</i>	13
Obr. 3	<i>Zrna grafitu v litině s kuličkovým grafitem (vlevo), strukturní model (vpravo) [8]</i>	14
Obr. 4	<i>Tahový diagram různých materiálů [9]</i>	16
Obr. 5	<i>Zkušební těleso ve tvaru Y</i>	17
Obr. 6	<i>Zkušební tyče pro statickou zkoušku tahem [11]</i>	18
Obr. 7	<i>Závislost tvrdosti v HB na mezi pevnosti u LLG [1]</i>	18
Obr. 8	<i>Zkouška tvrdosti podle Brinella [12]</i>	20
Obr. 9	<i>Rozdělení základních metod nedestruktivního zkoušení [13]</i>	21
Obr. 10	<i>Příčné vlnění [17]</i>	22
Obr. 11	<i>Podélné vlnění [17]</i>	22
Obr. 12	<i>Testování materiálu pomocí odrazové metody [19]</i>	23
Obr. 13	<i>Princip ultrazvukové průchodové metody [18]</i>	23
Obr. 14	<i>Princip prozařovací metody [20]</i>	24
Obr. 15	<i>Schéma rentgenky [18]</i>	24
Obr. 16	<i>Vyhodnocení odlehklých chyb funkcí boxplot</i>	26
Obr. 17	<i>Vyhodnocení statistických charakteristik</i>	27
Obr. 18	<i>Vyhodnocení trendu obsahu uhlíku</i>	27
Obr. 19	<i>Vyhodnocení statistických charakteristik u křemíku</i>	28
Obr. 20	<i>Vyhodnocení trendu křemíku</i>	29
Obr. 21	<i>Vyhodnocení statistických charakteristik manganu</i>	29
Obr. 22	<i>Vyhodnocení trendu obsahu manganu</i>	30
Obr. 23	<i>Vyhodnocení statistických charakteristik síry</i>	30
Obr. 24	<i>Vyhodnocení statistických charakteristik fosforu</i>	31
Obr. 25	<i>Vyhodnocení statistických charakteristik pro uhlíkový ekvivalent</i>	32
Obr. 26	<i>Vyhodnocení statistických charakteristik pro uhlík</i>	33
Obr. 27	<i>Vyhodnocení trendu obsahu uhlíku</i>	33
Obr. 28	<i>Vyhodnocení statistických charakteristik pro křemík</i>	34
Obr. 29	<i>Vyhodnocení trendu obsahu křemíku</i>	34
Obr. 30	<i>Vyhodnocení statistických charakteristik pro hořčík</i>	35
Obr. 31	<i>Vyhodnocení trendu obsahu hořčíku</i>	36
Obr. 32	<i>Vyhodnocení statistických charakteristik fosforu</i>	36
Obr. 33	<i>Vyhodnocení statistických charakteristik uhlíkového ekvivalentu</i>	37
Obr. 34	<i>Průběh tahových zkoušek pro litinu s lupínkovým grafitem</i>	38
Obr. 35	<i>Grafický závislost přetvoření na zatěžování během tahové zkoušky</i>	40
Obr. 36	<i>Hodnoty tvrdosti v litině s lupínkovým a kuličkovým grafitem v závislosti na tloušťce stěny odlitku</i>	41
Obr. 37	<i>Vzorek 19TA nelept. 100x</i>	42
Obr. 38	<i>Vzorek 19TA lept. 100x</i>	42
Obr. 39	<i>Vzorek 27TA1 nelept. 100x</i>	42
Obr. 40	<i>Vzorek 27TA1 lept. 100x</i>	42

Obr. 41	<i>Vzorek 18S4 nelept. 100x</i>	43
Obr. 42	<i>Vzorek 18S4 lept. 100x</i>	43
Obr. 43	<i>Vzorek 27S2 nelept. 100x</i>	43
Obr. 44	<i>Vzorek 27S2 lept. 100x</i>	43
Obr. 45	<i>Rentgenový snímek vzorků 5.1 a 5.2</i>	45
Obr. 46	<i>Rentgenový snímek vzorků 20.3 a 20.4</i>	45

Seznam tabulek

Tab. 1	<i>Vlastnosti a složení nelegovaných litin s lupínkovým grafitem (na odděleně lité tyči ø 30 mm) [1]</i>	12
Tab. 2	<i>Mechanické vlastnosti nelegovaných LKG na odděleně litých zkušebních tělesech [1]</i>	15
Tab. 3	<i>Rozdělení zkoušek tvrdosti [14]</i>	19
Tab. 4	<i>Tvrdost a struktura nelegovaných LLG (na odděleně lité tyči ø 30 mm) [1]</i>	20
Tab. 5	<i>Tvrdost a struktura nelegovaných LKG na přilitých zkušebních tělesech [1]</i>	20
Tab. 6	<i>Naměřené mechanické vlastnosti u litiny s lupínkovým grafitem</i>	38
Tab. 7	<i>Výsledné hodnoty mechanických vlastností zjištěné tahovou zkouškou ČSN EN 1653</i>	39
Tab. 8	<i>Výsledky měření tvrdosti pro LLG</i>	40
Tab. 9	<i>Výsledky měření tvrdosti pro LKG</i>	41
Tab. 10	<i>Metalografické hodnocení vzorků z litiny s kuličkovým grafitem</i>	43
Tab. 11	<i>Metalografické hodnocení vzorků z litiny s lupínkovým grafitem</i>	44
Tab. 12	<i>Podmínky pro měření prozařovací metodou</i>	45
Tab. 13	<i>Vyhodnocení prozařovací zkoušky</i>	46

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ČR	Česká republika
t	tuna
LLG	litina s lupínkovým grafitem
LKG	litina s kuličkovým grafitem
kg	kilogram
Fe ₃ C	karbid železa – cementit
Fe	železo
C	uhlík
obr.	obrázek
EN	evropská norma
ČSN	česká norma
GJL	označení litiny s lupínkovým grafitem
GJS	označení litiny s kuličkovým grafitem
CE	uhlíkový ekvivalent
R _m	mez pevnosti
MPa	megapascal
HB	hard brinell
S _c	stupeň sycení
Si	křemík
Mn	mangan
P	fosfor
S	síra
Cu	měď
°C	stupeň Celsia
mm	milimetr
Ni	nikl
A	tažnost
F	ferit
P	perlit
S	sorbit
B	bainit
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu
R _e	mez kluzu
ε _p	plastická deformace
tab.	tabulka
μm	mikrometr
S ₀	původní průřez
L ₀	původní délka
L _u	finální délka
F _{max}	maximální zatížení
Z	kontrakce
d _u	finální průměr
d ₀	původní průměr
D	průměr

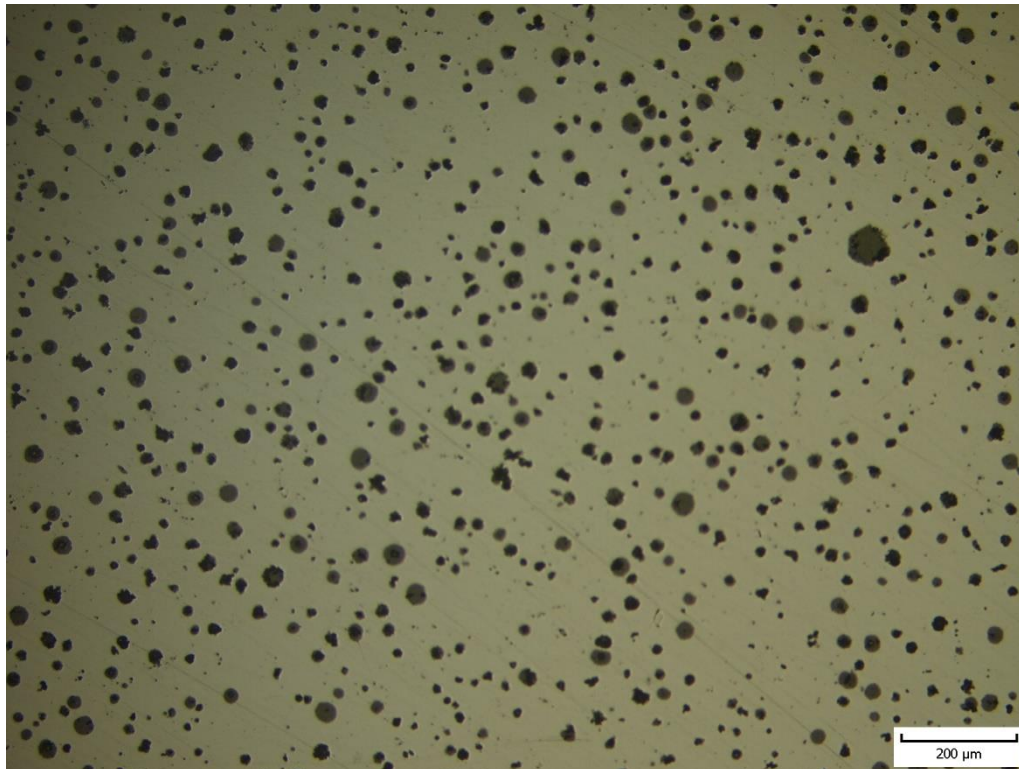
NDT	nedestruktivní zkoušení materiálu (non-destructive testing)
Hz	Hertz
kHz	kilohertz
c_t	rychlost šíření příčné vlny
c_L	rychlost šíření podélné vlny
Ir	iridium
Co	kobalt
keV	kiloelektronvolt
cm^2	centimetr čtverečný
nelept	neleptaný
lept	leptaný
t	čas
U	urychlovací napětí
I	proud
FFD	ohnisková vzdálenost příruby
RTG	rentgen
s	sekunda
min	minuta

SEZNAM PŘÍLOH

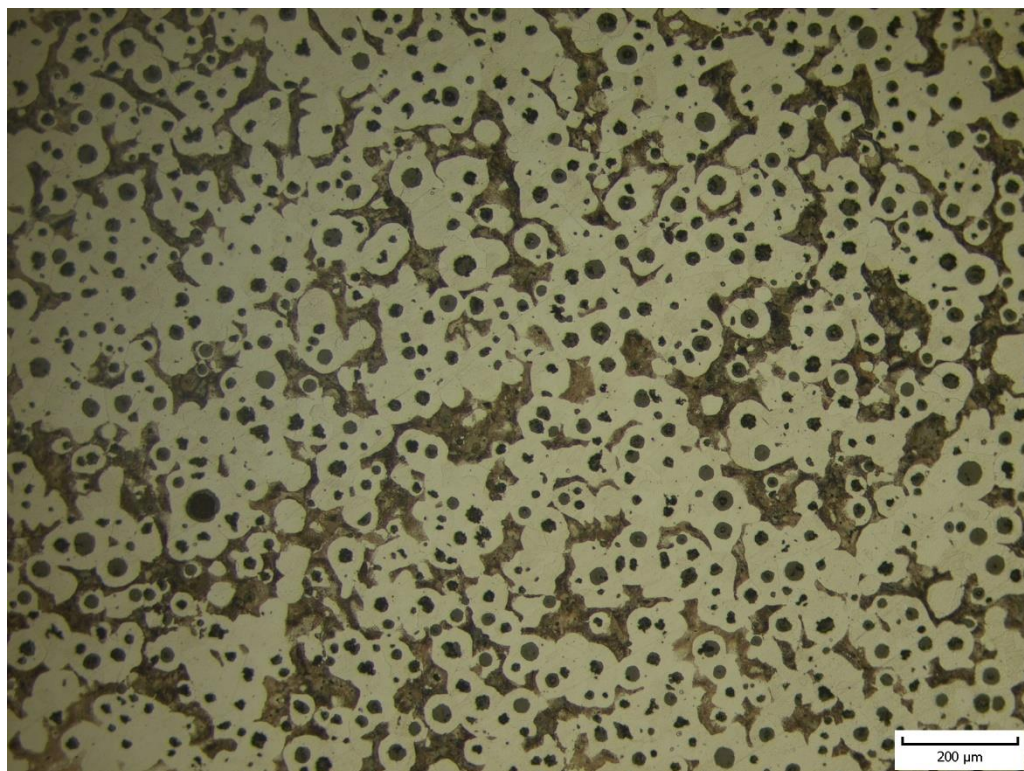
Příloha 1.1	Vzorek 18TA, nelept. 100x
Příloha 1.2	Vzorek 18TA, lept. 100x
Příloha 1.3	Vzorek 20TA1, nelept. 100x
Příloha 1.4	Vzorek 20TA1, lept. 100x
Příloha 1.5	Vzorek 20TA2, nelept. 100x
Příloha 1.6	Vzorek 20TA2, lept. 100x
Příloha 1.7	Vzorek 27TA2 nelept. 100x
Příloha 1.8	Vzorek 27TA2, lept. 100x
Příloha 2.1	Vzorek 19S5 nelept. 100x
Příloha 2.2	Vzorek 19S5 lept. 100x
Příloha 2.3	Vzorek 20S3 nelept. 100x
Příloha 2.4	Vzorek 20S3 lept. 100
Příloha 3.1	Rentgenový snímek vzorků 5.3 a 5.4
Příloha 3.2	Rentgenový snímek vzorků 10.1 a 10.2
Příloha 3.3	Rentgenový snímek vzorků 10.3 a 10.4
Příloha 3.4	Rentgenový snímek vzorků 20.1 a 20.2

PŘÍLOHY

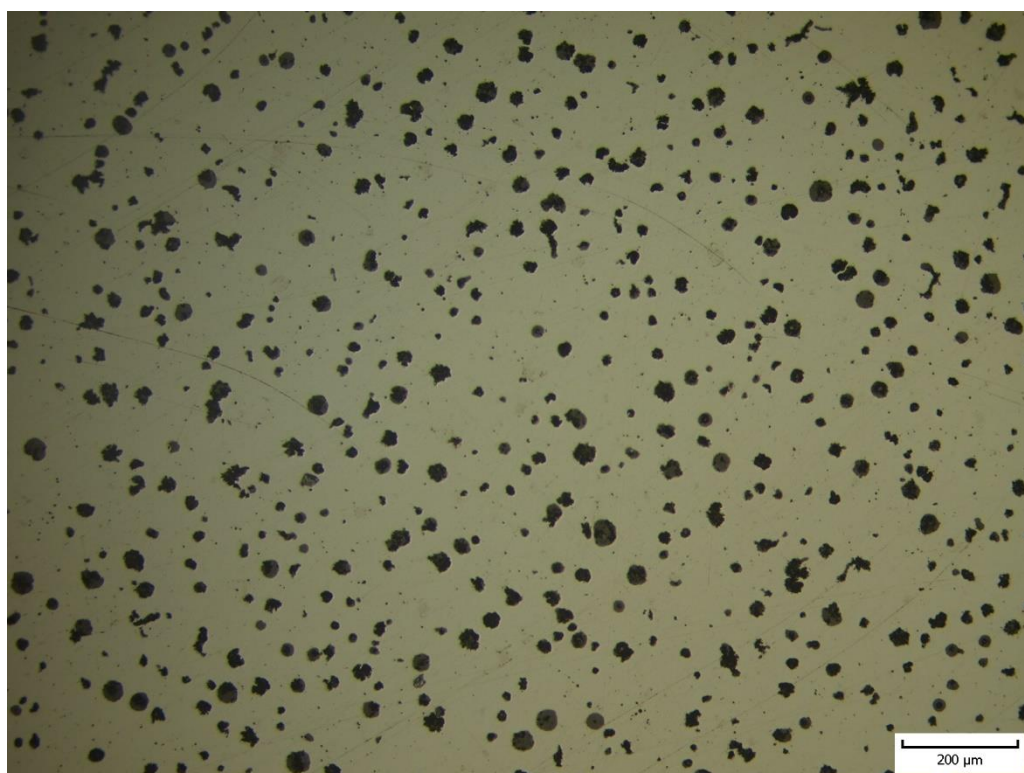
Příloha č.1 – Metalografické snímky LKG



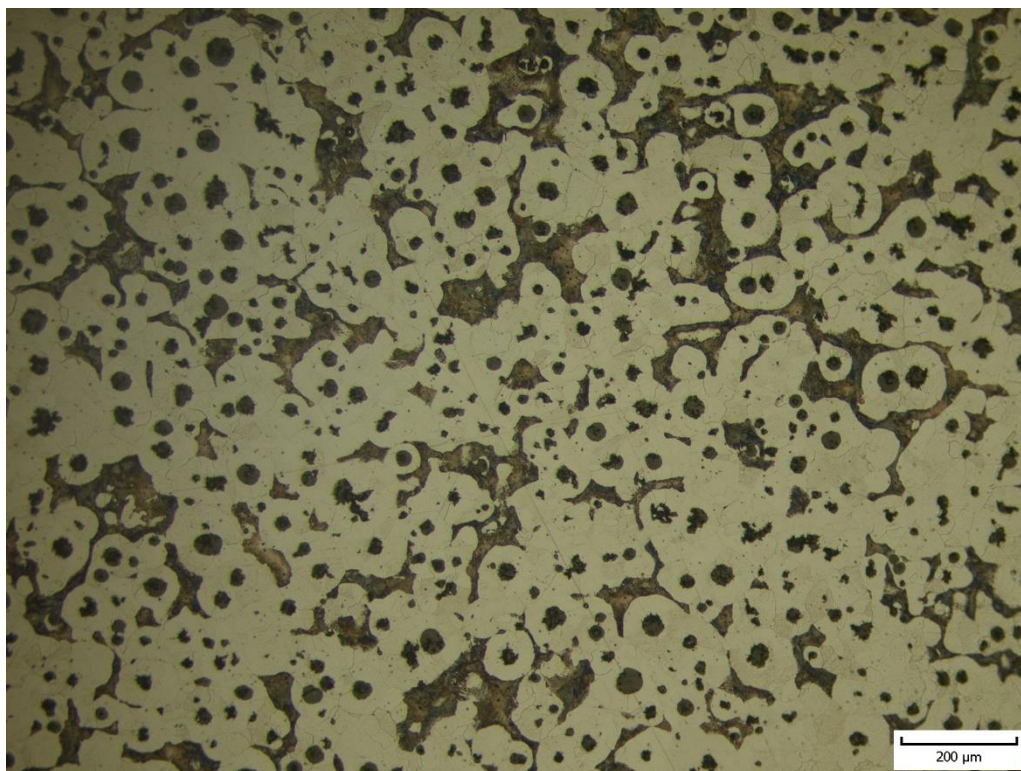
Příloha 1.1 *Vzorek 18TA, nelept. 100x*



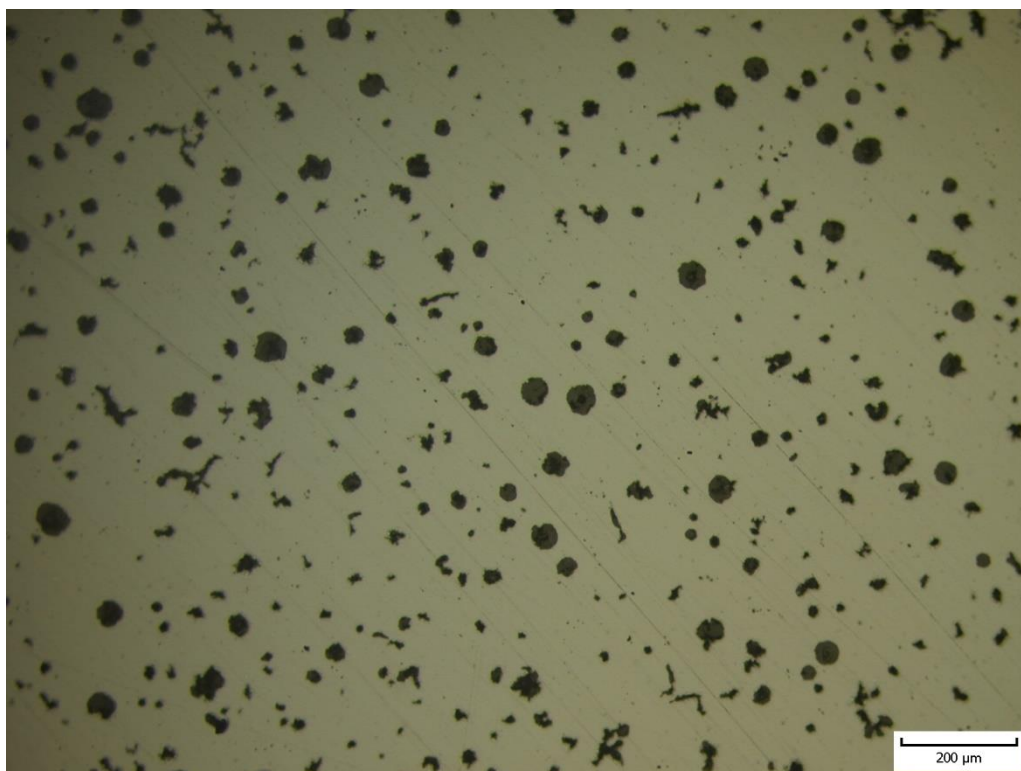
Příloha 1.2 *Vzorek 18TA, lept. 100x*



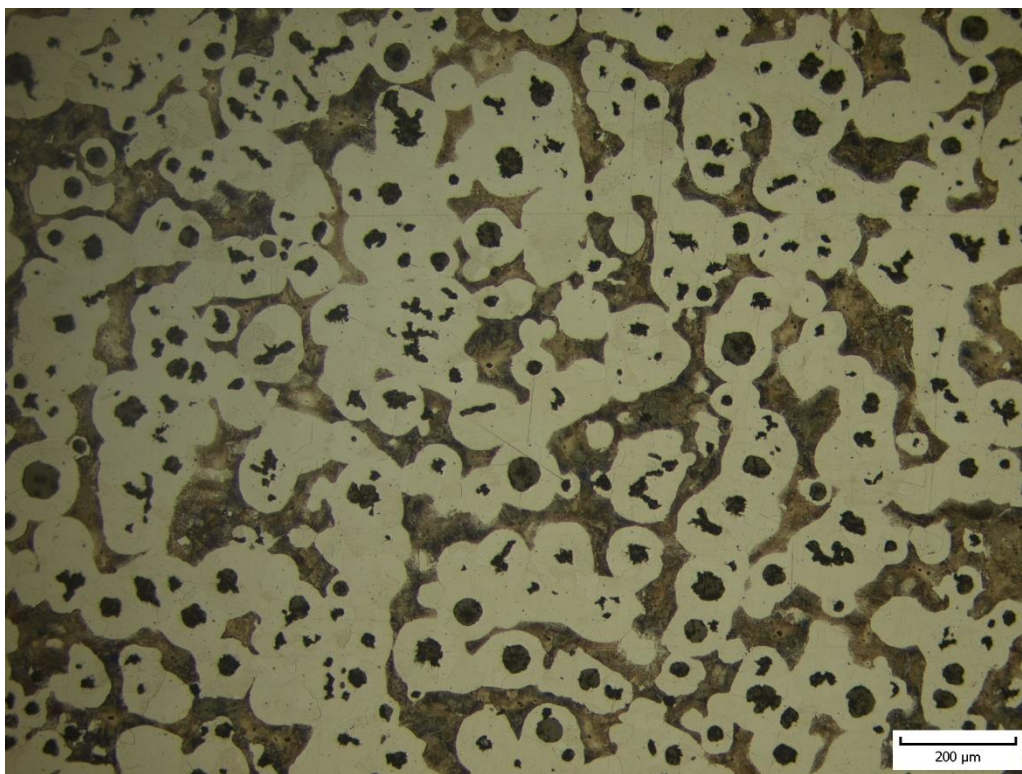
Příloha 1.3 *Vzorek 20TA1, nelept. 100x*



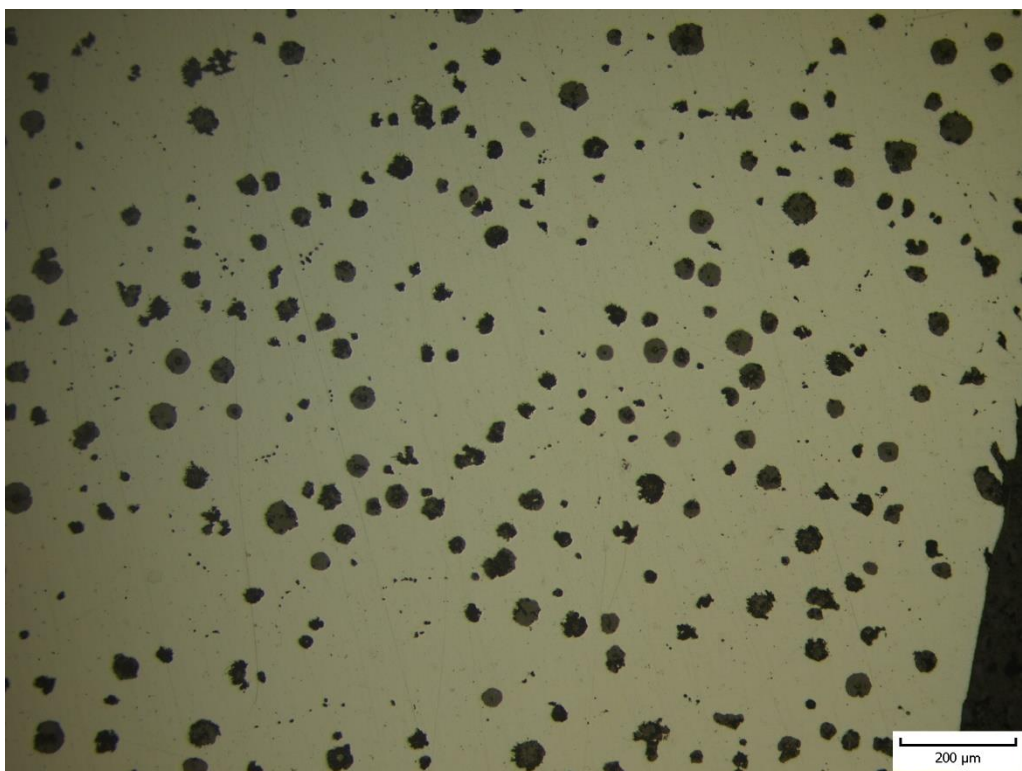
Příloha 1.4 *Vzorek 20TA1, lept. 100x*



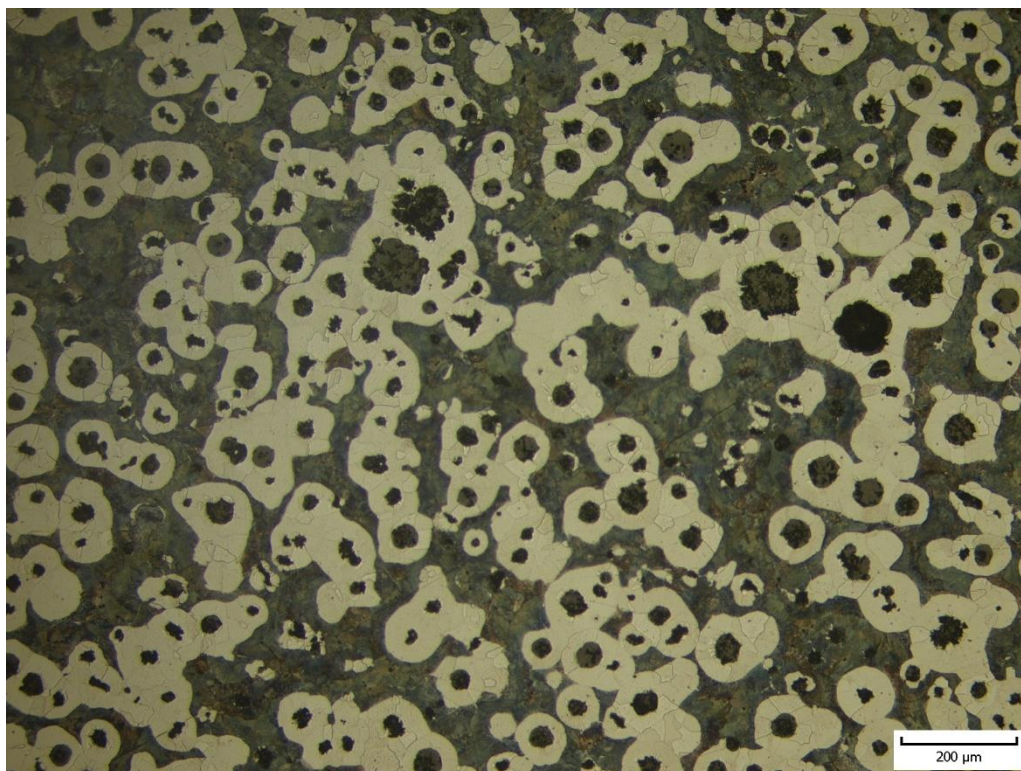
Příloha 1.5 *Vzorek 20TA2, nelept. 100x*



Příloha 1.6 *Vzorek 20TA2, lept. 100x*



Příloha 1.7 *Vzorek 27TA2 nelept. 100x*

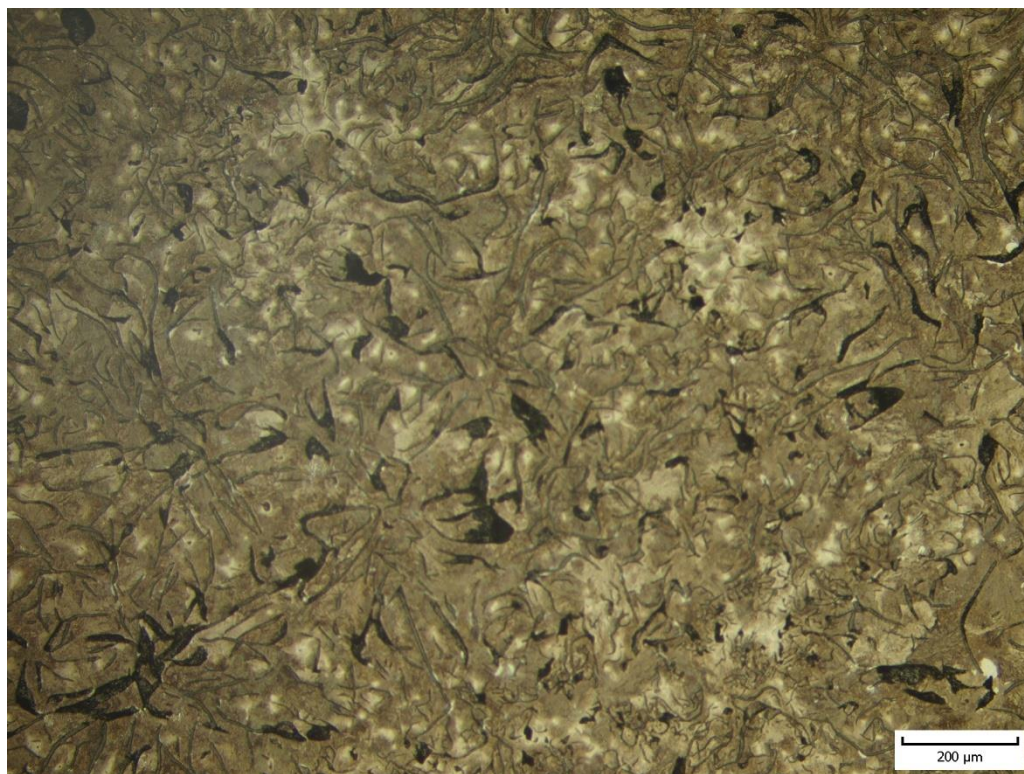


Příloha 1.8 *Vzorek 27TA2, lept. 100x*

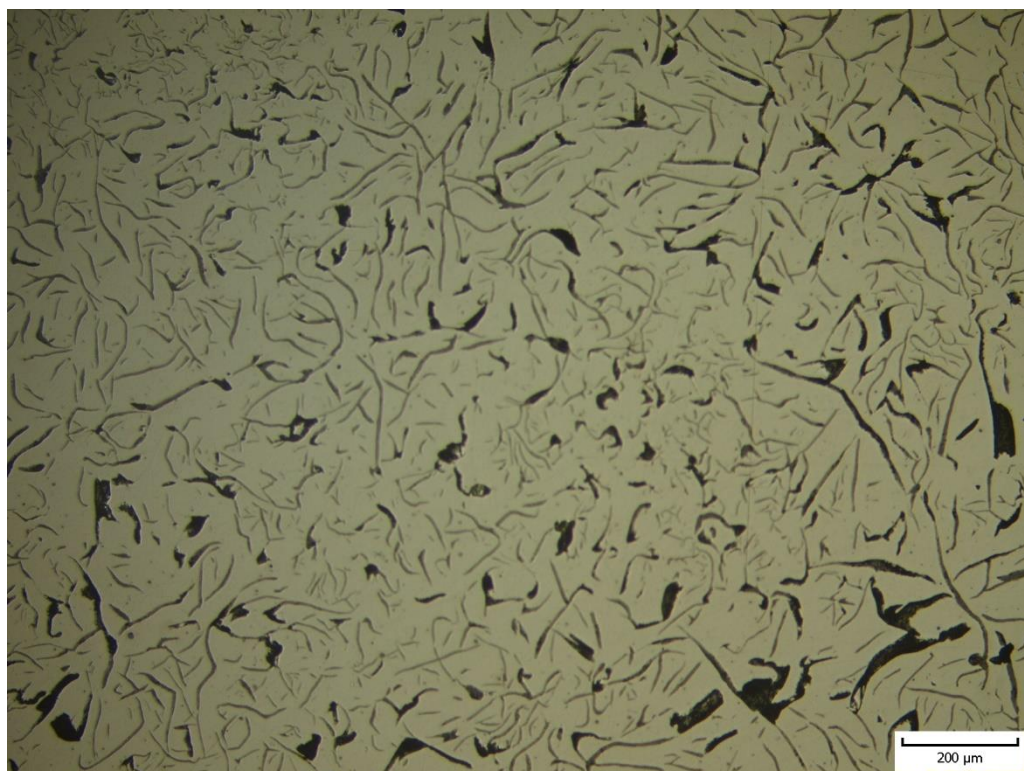
Příloha č.2 – Metalografické snímky LLG



Příloha 2.1 *Vzorek 19S5 nelept. 100x*



Příloha 2.2 *Vzorek 19S5 lept. 100x*



Příloha 2.3 *Vzorek 20S3 nelept. 100x*

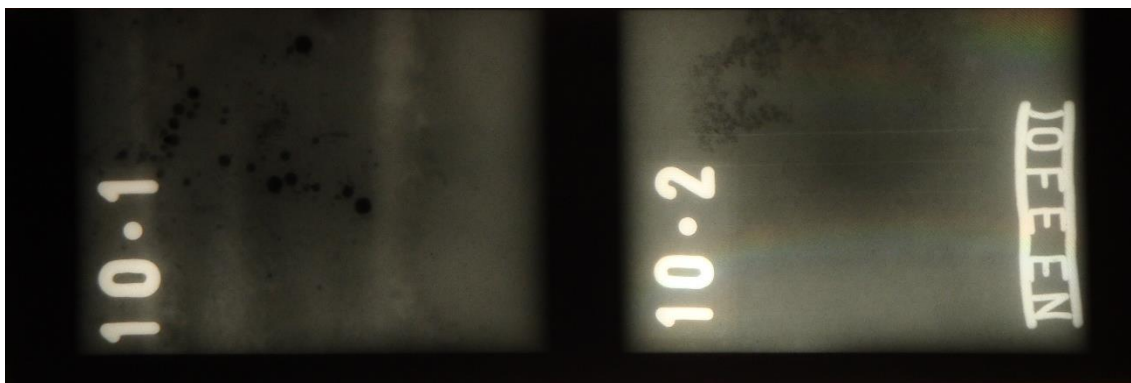


Příloha 2.4 *Vzorek 20S3 lept. 100x*

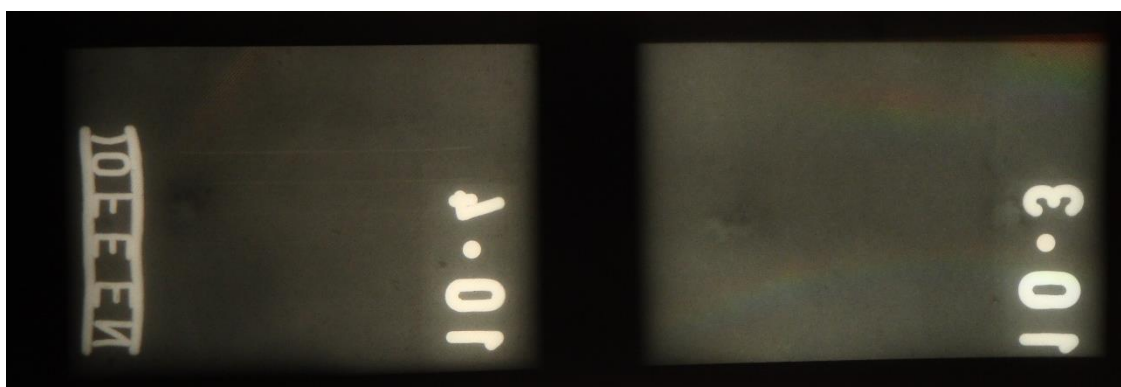
Příloha č.3 – Rentgenové snímky vnitřních vad



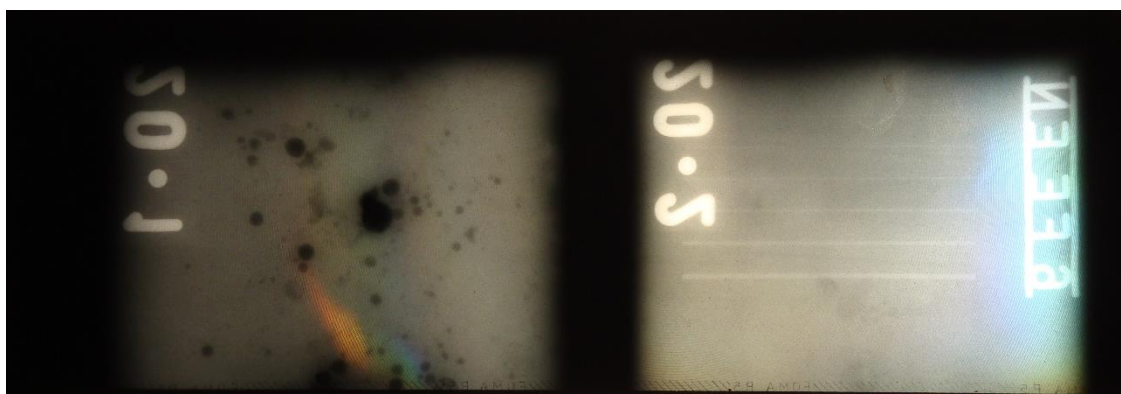
Příloha 3.1 *Rentgenový snímek vzorků 5.3 a 5.4*



Příloha 3.2 *Rentgenový snímek vzorků 10.1 a 10.2*



Příloha 3.3 *Rentgenový snímek vzorků 10.3 a 10.4*



Příloha 3.4 *Rentgenový snímek vzorků 20.1 a 20.2*